



Universidade do Porto

**FEUP** Faculdade de  
Engenharia

# **AVALIAÇÃO DO PROCESSO A IMPLEMENTAR NUMA CENTRAL DE COMPOSTAGEM: FORMULAÇÃO DE MISTURAS DE RESÍDUOS**

**MARIA JOÃO CERVEIRA FERNANDES**

Dissertação submetida para obtenção do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA DO AMBIENTE**

---

**Orientador académico:** Doutora Joana Maia Moreira Dias  
(Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais)

---

**Orientador na empresa:** Eng<sup>a</sup>. Filipa de Carvalho Pires Almeida

SETEMBRO DE 2012

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

Correio eletrónico: feup@fe.up.pt

Endereço eletrónico: <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente – 2011/2012 – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

## AGRADECIMENTOS

A execução deste trabalho só foi possível graças à contribuição de várias pessoas e entidades, a quem gostaria de expressar o meu profundo agradecimento e reconhecimento.

Em primeiro lugar à minha orientadora académica, Professora Doutora Joana Dias pela orientação metódica, disponibilidade permanente e apoio técnico e conceptual ao longo da realização deste trabalho.

À Eng<sup>a</sup>. Filipa Pires, tanto pela coorientação como pela amizade, paciência e boa disposição que sempre demonstrou, ajudando-me a definir objetivos e caminhos e a resolver problemas com que me deparei, fatores essenciais para a boa conclusão desta tese.

À Eng<sup>a</sup>. Patrícia Castro Gonçalves, Administradora da Gintegral, S.A., por todos os meios disponibilizados e pelo empenho, apoio e colaboração durante a realização deste trabalho.

A toda a fantástica equipa Gintegral, S.A. entre os quais os Eng.<sup>o</sup> Jorge Correia, Eng.<sup>o</sup> Pedro Lima, Eng.<sup>o</sup> Francisco Pinto, Eng<sup>a</sup>. Vera Cruz e Sr. Custódio Teixeira, por todo o apoio prestado e disponibilidade demonstrada.

Ao Professor Doutor José Augusto Fernandes, Diretor do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do Instituto Superior de Engenharia do Porto, e ao Eng.<sup>o</sup> Rogério Pinheiro, por todos os meios disponibilizados, empenho e tempo dedicado à realização deste trabalho.

À Eng<sup>a</sup>. Sílvia Cardinal Pinho, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pela ajuda e cedência dos meios necessários para a realização da parte experimental deste trabalho.

À Professora Doutora Olga Pastor Nunes, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pela disponibilidade de meios para realização das análises laboratoriais e da técnica de laboratório Sílvia Faia, por toda a amabilidade e apoio prestado.

Às minhas grandes amigas Carolina Passeira, Carolina Lucas, Diana Lopes, Joana Correia e Susana Santos pela amizade e momentos de felicidade que sempre me proporcionaram, pelos momentos bons e menos bons que passaram comigo e pelo apoio e motivação que sempre me deram.

À Gabriela Santos e ao José Costa, amigos eternos, por todos os passeios até ao café que me “obrigaram” a fazer, por toda a alegria que sempre me transmitiram e pelo apoio, compreensão e constante preocupação nos momentos em que estive mais ausente.

Finalmente, e com um carinho especial, quero agradecer:

À minha mãe, por todo o apoio que só uma mãe pode dar e que em momento nenhum me faltou, tanto a nível pessoal como a nível técnico, utilizando toda a sua imaginação e genialidade para encontrar soluções onde elas pareciam não existir.

Ao meu pai, por todas as horas dedicadas a este meu projeto, por todo o “know-how” transmitido, que em tempo útil ninguém me conseguiria transmitir, e pelo encorajamento nos momentos mais difíceis em que o tempo necessário não parecia caber no tempo disponível.

Ao meu irmão, por toda a animação e estímulo que só uma pessoa com o seu espírito e calma conseguiria transmitir.

Ao Pedro, um reconhecimento especial pela disponibilidade, motivação e espírito crítico que sempre o caracterizaram e que sempre me fizeram crescer como pessoa.

Aos meus Avós, tios e primos, por todo o carinho e palavras de estímulo que me dirigiram.

## RESUMO

O objetivo da presente dissertação prendeu-se com a aquisição de conhecimentos relativos ao processo de compostagem, em particular dos resíduos recebidos pela Empresa Gintegral, S.A., avaliando o seu potencial interesse e projetando a sua utilização em linha de compostagem a ser implementada.

No conjunto dos resíduos rececionados pela empresa, as lamas resultantes do tratamento de águas residuais apresentavam uma elevada expressão. Devido aos processos físico-químicos envolvidos no tratamento de águas residuais, as lamas tendem a concentrar os metais pesados e compostos orgânicos vestigiais pouco biodegradáveis, bem como organismos potencialmente patogénicos (vírus, bactérias, etc.). No entanto, são também ricas em nutrientes, tais como azoto e fósforo, e contêm matéria orgânica, útil para a recuperação de solos esgotados ou sujeitos a erosão, funcionando como fertilizante ou corretivo orgânico.

Assim, pretendeu-se estudar e selecionar uma formulação adequada duma mistura para o processo de compostagem, onde fossem integradas não só as lamas referidas, mas também outros resíduos orgânicos rececionados (como silagem de milho e ração de alimentação animal fora de prazo).

Numa fase inicial foram formuladas várias misturas de resíduos com qualidade para serem integradas num processo de compostagem de pequena escala, em pilhas revolvidas, por forma a estudar e encontrar uma boa solução para integração na Central de Compostagem da Empresa, à escala Industrial. O processo de compostagem foi realizado entre o dia 23 de Maio e 18 de Julho, tendo-se monitorizado e avaliado a qualidade do produto obtido no final do período de estudo.

O controlo do processo de compostagem e a realização das análises aos vários parâmetros permitiu constatar que a mistura constituída por 50% de lamas e 50% de outros resíduos (30% de estilha de madeira, 5% de cinzas de caldeira de biomassa, 5% de ração animal fora de especificação e 10% de silagem de milho) foi a que apresentou melhores resultados.

Dada a dimensão da experiência, não foi possível atingir temperaturas de higienização, pois a mais elevada foi de 50 °C.

De entre os parâmetros analisados, grande parte deles enquadrou-se com o exigido nas especificações técnicas, com exceção da concentração de *Escherichia Coli*, dada a falta de manutenção de temperaturas de higienização, bem como da quantidade de matéria orgânica que, em média, se encontra sobre o limite mínimo descrito nas especificações, devido a haver necessidade de um maior período de maturação.

Na perspetiva da empresa e suas necessidades imediatas, os resultados obtidos foram bastante úteis, uma vez que a partir deles foi dado início à atividade da Central de Compostagem, utilizando uma das misturas obtidas como base. O aumento da escala poderá vir a resolver os problemas microbiológicos encontrados.

**Palavras-Chave:** Lama de ETAR; Compostagem; Valorização orgânica; Composto Orgânico; Silagem de Milho.

## ABSTRACT

The main purpose of this project was the acquisition of knowledge regarding the composting process, especially of the waste received by the company Gintegral, S.A., and the assessment of their potential interest for a composting plant to be implemented.

The waste received by the company has a large contribution of sewage sludge resulting from the wastewater treatment.

As a result of the chemical and physical processes used in the treatment, sewage sludge tends to concentrate heavy metals and trace of other organic compounds which are difficult to biodegrade during the physical and chemical processing, as well as other potentially pathogenic organisms (virus, bacteria, etc.). However, they are also rich in nutrients, such as nitrogen and phosphorus and contain organic matter, useful for the recovery of exhausted soils, working as a fertilizer or an organic soil improver.

Therefore, it was intended to study and select the appropriate formulation for a mixture to be used on the composting process, where they were integrated, not only the sewage sludge but also other organic wastes received (such as corn silage and animal feed out of date).

At an early stage, several waste mixtures have been formulated with quality to be integrated on a small scale windrow composting process, as a basis for selecting one for the composting process at the Industrial scale, after sufficient assessment.

The composting process was carried out between May 23 and 18 July being monitored and the quality of the products obtained at the end of the period was further evaluated.

The control of the composting process and the analysis of various parameters showed that one of the mixtures, comprising 50% sludge from a sewage plant wastewater and 50% of the remaining wastes, including 30% wood chips, 5% biomass boiler ash, 5% off-specification animal feed and 10% silage corn was the mixture which showed the best results.

Due to the scale of the experiment it was not possible to reach hygienization temperatures, since the highest temperature measured was 50 ° C.

Most of the analyzed parameters fitted the required specifications, except the concentration of *Escherichia Coli*, given the lack of contact with hygienization temperatures, and also, the amount of organic matter that, on average, was about the minimum described by current specifications, value that may increase with a longer period of maturation.

Within the needs of the company, the results obtained were quite useful, since it was on the basis of them that the activity at the composting plant was initiated using one of the mixtures tested; and, with the increasing scale of production, microbiological problems may be solved.

**Keywords:** Sewage sludge; Composting, Organic Valorization; Organic Compound; Corn Silage.

## ÍNDICE

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivos .....	10
1.3	Estrutura.....	10
1.4	Compostagem .....	12
1.4.1	Conceitos.....	12
1.4.2	Descrição Geral do Processo .....	13
1.4.3	Tecnologias de compostagem.....	16
1.4.3.1	Sistemas abertos .....	17
1.4.3.2	Sistemas fechados .....	17
1.4.4	Controlo do Processo .....	18
1.4.4.1	Microrganismos.....	18
1.4.4.2	Parâmetros Físicos .....	19
a.	Temperatura.....	19
b.	Humidade .....	21
c.	Arejamento.....	22
d.	Odores.....	23
e.	Estrutura e Granulometria .....	25
1.4.4.3	Parâmetros Químicos.....	27
a.	Nutrientes.....	28
•	Razão C/N .....	29
b.	Metais Pesados.....	30
c.	Micropoluentes orgânicos.....	32
•	Policlorobifenilos (PCB) .....	33
•	PCDD/PCDF.....	33
•	Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (HAP).....	34
d.	pH .....	34
e.	Taxa de respiração – Taxa de consumo de O <sub>2</sub> /formação de CO <sub>2</sub> .....	36
1.4.5	O Composto.....	37
1.4.5.1	Caracterização .....	37
1.4.5.2	Aplicações.....	38
1.4.5.3	Enquadramento Legal .....	39
1.5	Revisão bibliográfica de Estudos Científicos recentes .....	43

1.5.1	Matérias-Primas a Compostar, Estruturantes e outros Adjuvantes .....	43
1.5.2	Processo de compostagem, características e controlo .....	46
1.6	Descrição da Empresa Gintegral, S.A. ....	49
2	Materiais e Métodos .....	51
2.1	Materiais .....	51
2.1.1	Matérias-Primas .....	51
2.1.1.1	Lama de Estação de Tratamento de Águas Residuais Urbanas.....	51
2.1.1.2	Resíduos de Rações .....	52
2.1.1.3	Resíduos de Silagem.....	52
2.1.1.4	Estruturante .....	52
2.1.1.5	Cinzas de biomassa .....	52
2.1.2	Reagentes e Materiais.....	53
2.1.2.1	Construção de pilhas e amostragem.....	53
2.1.2.2	Análise Granulométrica.....	55
2.1.2.3	Determinação da humidade.....	55
2.1.2.4	Determinação do mercúrio .....	56
2.1.2.5	Análise microbiológica – <i>Escherichia Coli</i> .....	57
2.1.2.6	Análise da matéria orgânica .....	58
2.1.2.7	Análise da constituição química.....	58
2.1.2.8	Análise da fitotoxicidade .....	59
2.2	Métodos .....	59
2.2.1	Compostagem – “Setup” .....	59
2.2.1.1	Manipulação prévia das lamas.....	59
2.2.1.2	Construção das pilhas.....	60
a.	Mistura e Proporção de Materiais .....	60
b.	Tamanho, Configuração e Medidas .....	62
c.	Construção .....	63
2.2.1.3	Resíduos .....	65
a.	Dimensão.....	65
b.	Microbiologia .....	67
c.	pH .....	68
d.	Revolvimento .....	69
2.2.2	Controlo do processo .....	70
2.2.2.1	Temperatura.....	70



2.2.2.2	Humidade .....	70
2.2.3	Determinação da Qualidade do Composto .....	71
2.2.3.1	Amostragem .....	71
2.2.3.2	Parâmetros físicos .....	72
a.	Humidade .....	72
b.	Granulometria .....	73
2.2.3.3	Análises Químicas.....	74
a.	Mercúrio.....	74
b.	Matéria Orgânica.....	75
c.	Composição química .....	76
2.2.3.4	Análises Microbiológicas .....	77
2.2.3.5	Análises de Fitotoxicidade.....	82
3	Resultados e discussão .....	85
3.1	Controlo do Processo de Compostagem.....	85
3.1.1	Temperatura.....	85
3.1.2	Termografia .....	92
3.1.3	Humidade .....	96
3.2	Qualidade do Composto – Resultados das análises e determinações efetuadas .....	98
3.2.1	Determinações Físicas .....	98
3.2.1.1	Humidade .....	98
3.2.1.2	Granulometria .....	98
3.2.2	Análises Químicas.....	99
3.2.2.1	Matéria Orgânica.....	99
3.2.2.2	Metais Pesados.....	100
3.2.2.3	Micropoluentes orgânicos.....	101
a.	Bifenilos policlorados (PCBs) .....	101
b.	Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (HAP).....	102
3.2.2.4	Composição Química.....	103
3.2.2.5	pH .....	107
3.2.3	Análises Microbiológicas – <i>Escherichia Coli</i> .....	108
3.2.4	Análises Fitotoxicidade.....	109
4	Conclusão .....	115
5	Bibliografia .....	119
6	Anexos.....	i



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Diversidade de resíduos de natureza orgânica (adaptado de Rocha, C.L.P. <sup>[1]</sup> ). ....	1
Figura 2 – Composição física média dos RSU em Portugal (Adaptado de Agência Portuguesa do Ambiente) <sup>[2]</sup> .....	2
Figura 3 – A – Distribuição geográfica da percentagem de população servida por ETAR em 2002 <sup>[7]</sup> ; B - Percentagem de população servida por uma estação de tratamento de águas residuais em Portugal, com omissão dos anos sem dados no Eurostat.....	4
Figura 4 – Fluxo material do processo de compostagem convencional (Adaptado de Livestock Engineering Unit & Environmental Practices Unit <sup>[24]</sup> ). ....	13
Figura 5 – Variações da temperatura ao longo do processo de compostagem (Adaptado de Epstein, E. <sup>[23]</sup> ).....	14
Figura 6 – Representação esquemática do processo de decomposição e estabilização da matéria orgânica (Adaptado de Gonçalves, M.S. <sup>[3]</sup> ).....	16
Figura 7 – Esquema resumo dos vários sistemas de compostagem (Adaptado de Epstein, E. <sup>[23]</sup> ). ....	17
Figura 8 – Fatores que influenciam o processo de compostagem e as interações entre eles (Schuchardt, F. <sup>[33]</sup> ). ....	18
Figura 9 – Representação esquemática dos intervalos de temperaturas suportados por cada tipo de microrganismos (Adaptado de Willey, J.M. <i>et al</i> <sup>[35]</sup> ).....	19
Figura 10 – Secção transversal de uma pilha de compostagem (Adaptado de Insam, H. e M. Bertoldi <sup>[29]</sup> ).....	23
Figura 11 – Ilustração da diferença dos espaços intersticiais onde pode circular a água consoante a granulometria das partículas (a) maior granulometria; (b) menor granulometria.	26
Figura 12 – Esquema da circulação de ar e água numa massa de resíduos em compostagem (Adaptado de Epstein, E. <sup>[44]</sup> ).....	27
Figura 13 – Complexos formados entre a matéria orgânica e os metais pesados (Adaptado de Tittarelli, F. <i>et al</i> <sup>[47]</sup> ). ....	32
Figura 14 – Esquema representativo dos intervalos de valor ótimo de pH e a denominação dos microrganismos que estão nesse grupo. ....	35
Figura 15 – Construção das pilhas.....	54
Figura 16 – Forma pretendida para as pilhas construídas. ....	54
Figura 17 – Peneiradora vibratória (a); Balança e <i>gobelet</i> para pesagem do composto (b); Conjunto de peneiros montados, vistos de cima (c).....	55
Figura 18 – Estufa utilizada para a medição da humidade. Estufa fechada (A); Estufa aberta com as placas de Petri, vidros de relógio e taças no seu interior (B).....	56
Figura 19 – Espectrofotómetro de absorção atómica e os seus constituintes. ....	57
Figura 20 – Computador (A), analisador de fluorescência de raios X (B) e botija de hélio (C). ..	58

Figura 21 – Medida de 100 mL (A), copos para mistura (B) e vaso (C); .....	59
Figura 22 – Visualização da forma das pilhas construídas: 1a e 1b – pilhas com mistura de 70 % de lamas e 30 % de restantes resíduos; 2a e 2b – pilhas com mistura de 50 % de lamas e 50 % de restantes resíduos (na mesma proporção que na mistura 1); 3a e 3b - pilhas com mistura de 50 % de lamas e 50 % de restantes resíduos, maioritariamente estilha. ....	63
Figura 23 – Construção de uma das pilhas.....	64
Figura 24 – Esquema da sequência de materiais a adicionar ao longo da construção das pilhas de compostagem.....	65
Figura 25 – Imagem dos resíduos utilizados para comparação de granulometria. ....	67
Figura 26 – A – <i>Datataker</i> – Estação de medição de temperatura; B – Computador para aquisição de dados. ....	70
Figura 27 – Exemplo de duas frações acumuladas nos peneiros 14mm (esquerda) e 2mm (direita).....	73
Figura 28 – Sequência de medição da composição química das amostras. ....	77
Figura 29 – Frasco com meio <i>Lauryl Sulfate Broth</i> em pó (esquerda); meio distribuído pelas placas de Petri (centro). Frasco com Agar em pó (direita). ....	78
Figura 30 – Frasco com meio <i>Fluorocult</i> em pó (esquerda); tubos de ensaio com meio <i>Fluorocult</i> e tubo Durham invertido (direita).....	78
Figura 31 – Exterior da autoclave (esquerda); material no interior da autoclave (direito).....	79
Figura 32 – Equipamento onde foi realizada a agitação das amostras.....	80
Figura 33 – Materiais utilizados na filtração. ....	81
Figura 34 – Processo de amostragem. ....	85
Figura 35 – Temperaturas medidas desde a construção das pilhas (23 de Maio) até ao primeiro revolvimento (19 de Junho) no centro de cada pilha e temperatura ambiente (Tamb). ....	86
Figura 36 – Temperaturas medidas desde o primeiro revolvimento (19 de Junho) até ao segundo revolvimento (3 de Julho) no centro de cada pilha e temperatura ambiente (Tamb). ....	88
Figura 37 – Temperaturas medidas desde o segundo revolvimento (2 de Julho) até ao terceiro revolvimento (16 de Julho) no centro de cada pilha e temperatura ambiente (Tamb). ....	89
Figura 38 – Temperaturas medidas desde o último revolvimento (17 de Julho) até ao terceiro revolvimento (16 de Julho) no centro de cada pilha e temperatura ambiente (Tamb). ....	90
Figura 39 – Imagens termográficas de quatro dias de processo de compostagem distintos, da pilha 1a.....	92
Figura 40 – Imagens termográficas de quatro dias de processo de compostagem distintos, da pilha 1b.....	93
Figura 41 – Imagens termográficas de quatro dias de processo de compostagem distintos, da pilha 2a.....	93
Figura 42 – Imagens termográficas de quatro dias de processo de compostagem distintos, da pilha 2b.....	94

Figura 43 – Imagens termográficas de quatro dias de processo de compostagem distintos, da pilha 3a.....	95
Figura 44 – Imagens termográficas de três dias de processo de compostagem distintos, da pilha 3b.....	95
Figura 45 – Comprimento da maior folha de cada vaso. ....	109
Figura 46 – Número de folhas de alface em cada vaso.....	110
Figura 47 – Reportagem fotográfica do vaso 9 (vaso com maior crescimento). ....	112
Figura 48 – Reportagem fotográfica do vaso 15 (vaso com menor crescimento). ....	112
Figura 49 – Reportagem fotográfica do vaso 14 (vaso com 2/3 de Terra e 1/3 de Turfa - Controlo). ....	113
Figura I-1– Desenho máquina revolvedora (Adaptado de Schuchardt, F. <sup>[33]</sup> ). ....	ii
Figura I-2 – Fotografia da Máquina revolvedora Backhus 16.30 da empresa Gintegral.....	iii
Figura I-3 – Esquema do sistema de compostagem em canais ou trincheiras (Adaptado de British Columbia Ministry of Agriculture and Food <sup>[43]</sup> ). ....	vi
Figura I-4 - Fluxograma de instalação de compostagem com tambor rotativo em edifício fechado (Adaptado de Schuchardt, F. <sup>[33]</sup> ). ....	xii
Figura VI-1 – Diagrama da Linha de Tratamento da ETAR de Fátima <sup>[91]</sup> . ....	xlili
Figura VIII-1 – Procedimento utilizado para a amostragem. ....	xlvi
Figura X-1 – Reta de Calibração. ....	xlvi
Figura XII-1 – Gráfico das temperaturas atingidas durante todo o processo monitorizado, das seis pilhas construídas.....	xliv
XIII-1 – Exemplo de boletim analítico da composição química.....	I
Figura XIV-1 – Reportagem fotográfica do vaso 1.....	li
Figura XIV-2 - Reportagem fotográfica do vaso 2. ....	li
Figura XIV-3 - Reportagem fotográfica do vaso 3. ....	lii
Figura XIV-4 - Reportagem fotográfica do vaso 4. ....	lii
Figura XIV-5 – Reportagem fotográfica do vaso 5.....	liii
Figura XIV-6 - Reportagem fotográfica do vaso 6. ....	liii
Figura XIV-7 - Reportagem fotográfica do vaso 7. ....	liv
Figura XIV-8 - Reportagem fotográfica do vaso 8. ....	liv
Figura XIV-9 – Reportagem fotográfica do vaso 10.....	lv
Figura XIV-10 - Reportagem fotográfica do vaso 11. ....	lv
Figura XIV-11 – Reportagem fotográfica do vaso 12.....	lvi
Figura XIV-12 – Reportagem fotográfica do vaso 13.....	lvi

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros utilizados para definir a qualidade do composto (Adaptado de Eggerth, L.L. <i>et al</i> <sup>[60]</sup> ).	38
Tabela 2 – Parâmetros de temperatura, tempo de tratamento e número de revolvimentos a cumprir (Adaptado de European Commission - Directorate-General Environment <sup>[13]</sup> ).	40
Tabela 3 – Limites para alguns metais pesados, contaminantes, agentes patogénicos entre outros (Adaptado de European Commission - Directorate-General Environment <sup>[13]</sup> ).	40
Tabela 4 – Valores máximos admissíveis no composto para os teores “totais” de metais pesados, materiais inertes antropogénicos*, pedras de granulometria superior a 5 mm (valores reportados à matéria seca) e valores máximos admissíveis relativos à concentração em microrganismos patogénicos (valores reportados à matéria fresca) <sup>[13, 15]</sup> .	41
Tabela 5 – Valores máximos admissíveis para os teores totais de metais pesados no composto (adaptado de (2007/64/CE) - Comité do Rótulo Ecológico da União Europeia, <sup>[62, 63]</sup> ).	42
Tabela 6 – Valores máximos admissíveis de agentes patogénicos (valores reportados à matéria seca) (adaptado de (2007/64/CE) - Comité do Rótulo Ecológico da União Europeia, <sup>[62, 63]</sup> ).	42
Tabela 7 – Resumo dos valores característicos dos parâmetros analisados na Lama de ETAR utilizada.	51
Tabela 8 – Parâmetros característicos das cinzas de caldeira de biomassa utilizadas.	53
Tabela 9 – Percentagem de resíduos utilizados nas três misturas experimentadas.	61
Tabela 10 – Proporções de resíduos utilizados nas misturas 1, 2 e 3 (M <sub>1</sub> , M <sub>2</sub> e M <sub>3</sub> , respetivamente), quantidade dos resíduos no grupo onde se inserem – Q/P – (Lama ou Restantes Resíduos) e dados de cada resíduo (Densidade e Humidade).	61
Tabela 11 - Humidade e densidade das misturas realizadas.	62
Tabela 12 – Valores obtidos para a massa de cada material e de cada mistura.	62
Tabela 13 – Calibre das partículas dos materiais da mistura a compostar.	66
Tabela 14 – Temperatura e tempo de exposição necessários para a destruição de alguns dos agentes patogénicos e parasitas mais comuns (adaptado de Tchobanoglous, G. <i>et al</i> <sup>[17]</sup> ).	68
Tabela 15 – Número de amostra, pilha de onde foi retirada a amostra e massa de amostra utilizada.	75
Tabela 16 – Proporções utilizadas em cada vaso.	83
Tabela 17 – Valores da humidade nas pilhas de compostagem, medidos ao longo do processo.	96
Tabela 18 – Massa total da amostra analisada e das quantidades retidas em cada peneiro.	98
Tabela 19 – Percentagem de amostra retida em cada peneiro.	99
Tabela 20 – Valores da matéria orgânica da lama utilizada para a construção das pilhas, e das amostras de composto 2a e 2b.	100

Tabela 21 – Concentração de metais pesados nas amostras de composto analisadas e na lama utilizada como matéria-prima no processo. ....	101
Tabela 22 – Composição química das amostras retiradas dia 20 de Junho de 2012 da respetiva pilha de compostagem.....	103
Tabela 23 – Composição química das amostras analisadas a dia 21 de Julho de 2012. ....	105
Tabela 24 – Composição química da cinza, analisada dia 21 de Julho de 2012.....	106
Tabela 25 – Valores de pH medido em amostras retiradas ao longo do processo de compostagem.....	107
Tabela 26 – Quantidades de E. Coli medida nas amostras de composto orgânico analisadas.	108
Tabela 27 – Resumo de todos os resultados obtidos comparáveis com as especificações técnicas (as células a vermelho representam os valores fora de todas as classes).....	114
Tabela 6 - III-1 - Principais compostos naturais usados como substrato para a decomposição (Adaptado de Insam, H. and M. Bertoldi <sup>[29]</sup> ).....	xiv
Tabela IV-1 – Algumas das características físicas desejáveis para o composto (Adaptado de Eggerth, L.L. <sup>[60]</sup> ). ....	xv
Tabela IX-1 – Resultados da análise de humidade do dia 20/06/2012.....	xlvi
Tabela X-1 – Medição das soluções padrão de Mercúrio. ....	xlvi

## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

E. Coli – *Escherichia Coli*

ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais

HAP – Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos ou Hidrocarbonetos poliaromáticos

ISQ – Instituto de Soldadura e Qualidade

LABQUI – Laboratório de Química e Ambiente do ISQ

LER – Lista Europeia de Resíduos

MO – Matéria Orgânica

PCB – Polychlorinated Biphenyls (Bifenilos policlorados)

PCDD – Policlorodibenzodioxinas

PCDF – Policlorodibenzofuranos

Razão C/N – Razão Carbono/Azoto

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

COT – Carbono Orgânico Total

UFC – Unidades Formadoras de Colónias



## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Enquadramento

Um resíduo é definido legalmente como *“qualquer substância ou objeto de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer”* (Decreto – Lei nº 73/2011 de 17 de Junho, que altera em parte o Decreto-Lei nº 178/2006 de 5 de Setembro).

Já os resíduos orgânicos biodegradáveis, tal como são definidos no Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de Agosto, que revoga o Decreto-Lei nº 152/2002, de 23 de Maio, são aqueles *“que podem ser sujeitos a uma decomposição biológica anaeróbia ou aeróbia, designadamente os resíduos alimentares e de jardim, o papel e o cartão;”*.

Por outro lado, também é importante reter o conceito de biorresíduos, apresentados no Decreto-Lei nº 73/2011, de 17 de Junho, como *“os resíduos biodegradáveis de espaços verdes, nomeadamente os de jardins, parques, campos desportivos, bem como os resíduos biodegradáveis alimentares e de cozinha das habitações, das unidades de fornecimento de refeições e de retalho e os resíduos similares das unidades de transformação de alimentos”*.

Em Portugal podem ser identificados como resíduos biodegradáveis, ou biorresíduos, os indicados na Figura 1 <sup>[1]</sup>.

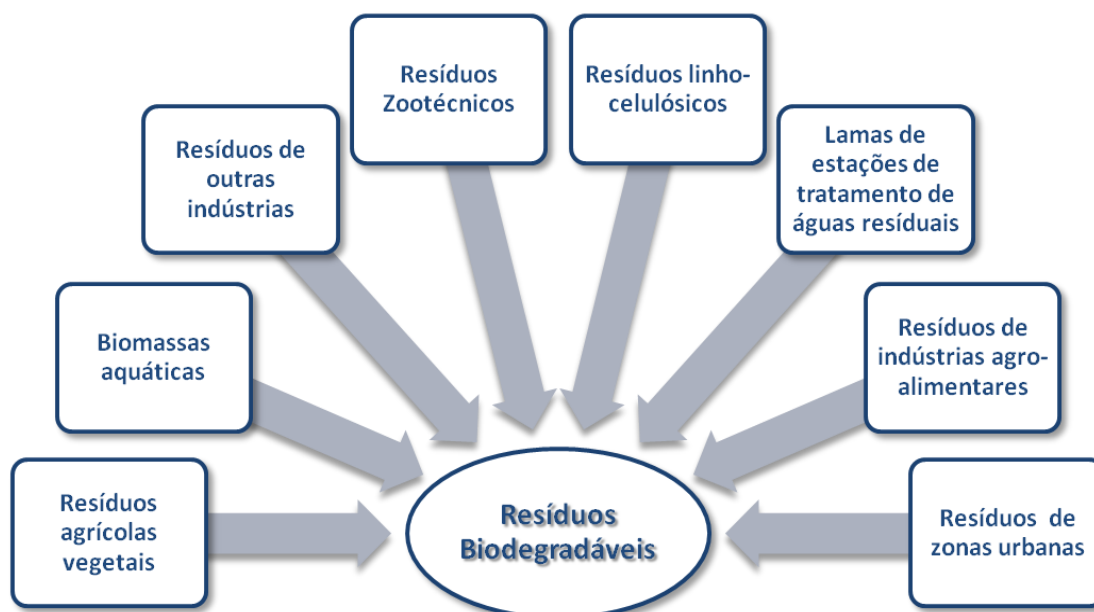


Figura 1 – Diversidade de resíduos de natureza orgânica (adaptado de Rocha, C.L.P. <sup>[1]</sup>).

Quando analisada a constituição dos resíduos produzidos em Portugal, no sentido de averiguar qual a tipologia mais produzida, é possível verificar através da composição física

média dos RSU, que os resíduos orgânicos biodegradáveis são os que apresentam maior quantidade (Figura 2).

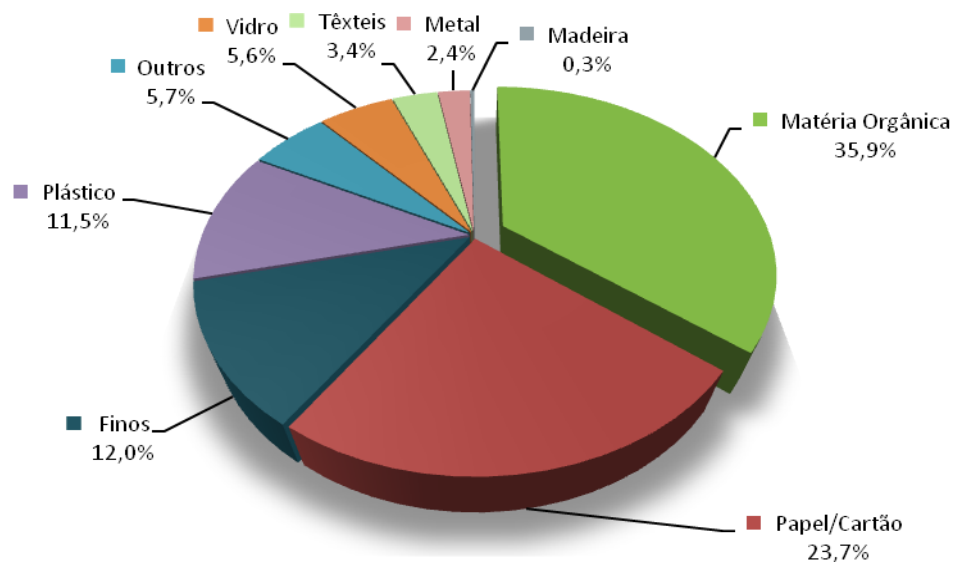


Figura 2 – Composição física média dos RSU em Portugal (Adaptado de Agência Portuguesa do Ambiente)<sup>[2]</sup>.

Para além das elevadas quantidades de resíduos orgânicos que hoje em dia são gerados, outra das grandes problemáticas desta tipologia de resíduos é a respetiva constituição. Os resíduos orgânicos produzidos em Portugal, tal como nos restantes países da União Europeia, podem apresentar teores relativamente elevados de metais pesados, micropoluentes orgânicos e microrganismos patogénicos, o que tem provocado uma grande preocupação não só entre entidades oficiais responsáveis pela gestão desta tipologia de resíduos, mas também nas instituições ligadas à defesa do ambiente e populações sensíveis a esta problemática. O desenvolvimento legislativo e normativo nesta área tem sido o resultado mais evidente desta preocupação, promovendo a diminuição dos resíduos orgânicos e sua valorização, considerando as várias componentes da sua gestão, desde a produção e processamento até à utilização na agricultura<sup>[3]</sup>.

Na ótica dos resíduos orgânicos existentes – os provenientes dos resíduos urbanos, resíduos florestais, resíduos agrícolas vegetais e outros – há uma tipologia que se evidencia, a dos resíduos resultantes de explorações pecuárias. Estes, para além da sua utilidade agrícola, são originados em quantidades elevadas em algumas zonas rurais com grande expressão na União Europeia. Contrariamente, pelo facto das zonas onde são produzidos os resíduos orgânicos não serem áreas consideradas agrícolas, restringe o seu aproveitamento<sup>[3]</sup>.

A nível nacional, devido à evolução, crescimento e desenvolvimento da sociedade, constata-se uma crescente produção de águas residuais <sup>[4]</sup>. Uma vez que, tanto as águas residuais domésticas como as águas de algumas indústrias podem conter elementos que, quando lançados diretamente nos meios hídricos recetores, bem como cursos de água, lagos, mar ou até mesmo no solo, criam graves consequências no meio ambiente, torna-se indispensável o seu tratamento, sendo que este inclui a eliminação ou redução das substâncias em suspensão e da carga orgânica até limites aceitáveis. Estes limites variam de acordo com as características do meio recetor<sup>[5]</sup>. A resolução destes problemas de saneamento básico, em particular no domínio do tratamento de esgotos domésticos, é uma prioridade e uma questão de saúde pública, tendo-se assistido, tal como seria expectável, a um aumento significativo da quantidade de Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) em funcionamento no nosso País, bem como na maioria dos outros países <sup>[4, 5]</sup>.

Segundo o Anuário Estatístico de Portugal 2010, elaborado pelo Instituto Nacional de Estatística, que apresenta a percentagem de população servida por ETAR, desde o ano de 2000 até 2009, só 50 % da população era servida por ETAR no ano 2000, verificando-se um grande aumento até 2009, ano em que já 73 % da população era servida por estas instalações <sup>[6]</sup>. Ao longo dos anos a quantidade destas instalações foi variando, sendo que algumas abriram e outras deixaram de funcionar (Figura 3 B). Também ao longo do País esta percentagem vai variando (Figura 3 A).

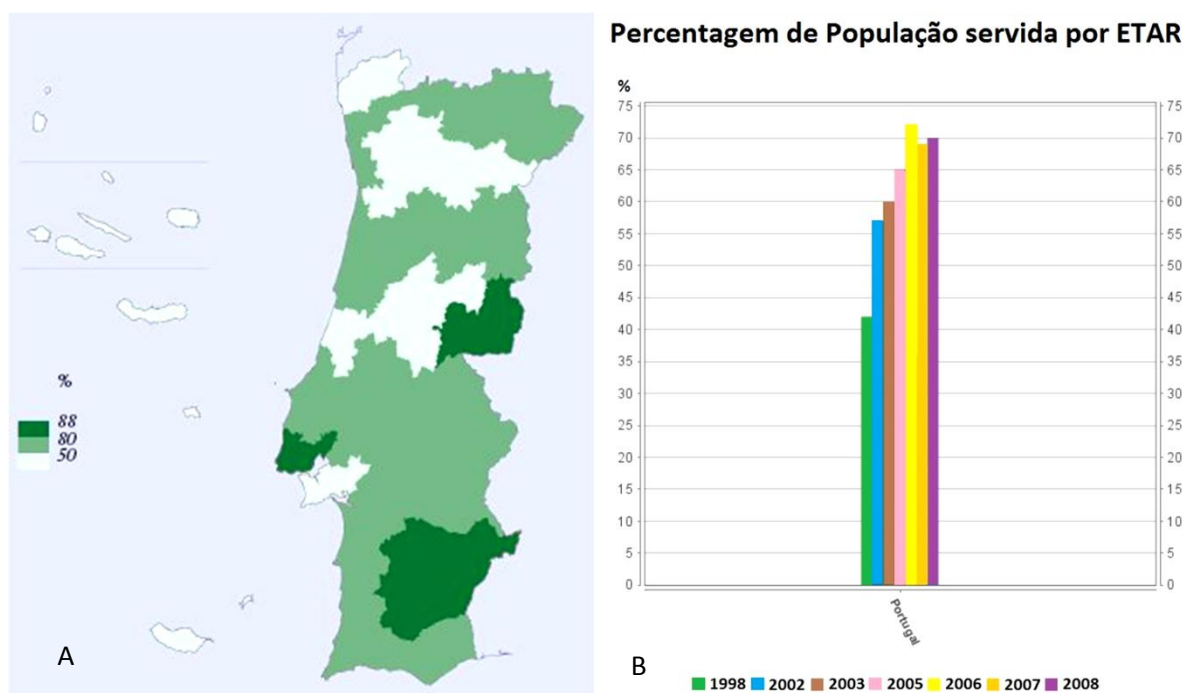


Figura 3 – A – Distribuição geográfica da percentagem de população servida por ETAR em 2002 <sup>[7]</sup>; B - Percentagem de população servida por uma estação de tratamento de águas residuais em Portugal, com omissão dos anos sem dados no Eurostat.

Estas unidades promovem, tal como o nome indica, o tratamento de águas residuais, urbanas ou industriais, para que mais tarde estas possam ser lançadas no meio hídrico, sem provocar impactes negativos <sup>[4]</sup>.

A composição das águas residuais domésticas ou urbanas é relativamente constante, uma vez que o dia-a-dia e as rotinas das famílias de um mesmo país são muito semelhantes <sup>[5]</sup>. Este tipo de águas é rico em alguns componentes como detergentes e sabão, e apresenta elementos facilmente putrescíveis, nomeadamente matérias fecais. As águas são, também, ricas em bactérias e podem conter germes patogénicos e parasitas intestinais <sup>[5]</sup>. As características que definem estas águas são o caudal e a carga poluidora. O aumento populacional (turismo), a variação da atividade em estabelecimentos industriais e a variação da precipitação são alguns dos motivos para essas variações de caudal <sup>[5]</sup>.

Por outro lado, pode ocorrer, pontualmente, a diminuição da eficiência das ETAR devido a caudais atípicos que alteram o caudal real, levando à sua diluição ou alterando-o qualitativamente. Deste modo, as variações sazonais relativamente a cargas orgânicas e ao caudal devem ser bem estudadas e conhecidas <sup>[5]</sup>.

Os processos de tratamento de águas residuais domésticas e industriais que ocorrem nessas estações de tratamento, por via biológica ou recorrendo a processos físico-químicos, implicam a separação e concentração de poluentes num resíduo final, designado por “lama” <sup>[5]</sup>.

Este resíduo apresenta uma elevada variação de quantidade e de características, consoante a dimensão da ETAR e o tipo do efluente tratado. Este subproduto inevitável do tratamento de águas residuais é essencialmente proveniente da acumulação dos produtos em suspensão na água residual afluente e sofre, geralmente, transformações pela ação de microrganismos atuantes durante este tratamento <sup>[4]</sup>.

Segundo Gonçalves, M. <sup>[3]</sup>, alguns dos parâmetros geradores de maior preocupação são os “*microrganismos patogénicos, metais pesados, micropoluentes orgânicos e metabolitos fitotóxicos*” que, aliados às grandes quantidades geradas, têm suscitado grande mobilização não só nas entidades responsáveis pela gestão destes resíduos mas também nas instituições defensoras do ambiente <sup>[3]</sup>.

À luz da legislação nacional e europeia em vigor, este tipo de lamas é um resíduo que necessita de ser devidamente eliminado ou valorizado, tornando-se imprescindível que lhe seja providenciado um destino final adequado <sup>[2]</sup>.

A gestão das lamas produzidas nas Estações de Tratamento de Águas Residuais tem vindo a ser cada vez mais difícil, dado o aumento significativo da sua produção, o que levou a que passasse a ser um tema de extrema importância em toda a União Europeia e um grande desafio para o desenvolvimento de novas tecnologias com vista ao respetivo tratamento. O elevado teor de humidade destas lamas, especialmente quando obtidas através dos métodos tradicionais de tratamentos de águas residuais, leva a que a maior fonte de custos da sua gestão seja o transporte para destino final <sup>[8]</sup>.

A exigência no nível de tratamento aplicado a estas lamas tem vindo a aumentar, dado que existem cada vez mais limitações, impostas por leis europeias e nacionais, para o seu destino final <sup>[8]</sup>.

A contaminação de solos e recursos hídricos, a produção de odores desagradáveis e o impacto visual negativo, são alguns dos problemas que podem advir da má gestão e tratamento deste resíduo, pelo que é necessário e urgente encontrar soluções de gestão viáveis e adequadas para o seu tratamento, valorização e/ou eliminação <sup>[5]</sup>.

A definição de soluções de tratamento que melhorem a qualidade final das lamas, que permitam a diminuição da sua quantidade e a redução de volume é privilegiada no sentido de otimizar a gestão de lamas e consequente redução de custos, permitindo também salvaguardar a saúde pública e o ambiente <sup>[8]</sup>.

Até hoje, as opções normalmente aplicadas como destino final para as lamas vão desde a sua aplicação na agricultura, até à incineração ou deposição em aterros <sup>[8]</sup>.

O interesse agrícola deste tipo de resíduos orgânicos, aliado às necessidades de correção orgânica dos solos agrícolas nacionais, tal como da restante União Europeia, fazem

com que as lamas apresentem um elevado potencial como produto de valorização agrícola aplicado como medida ambientalmente sustentável, dado que apresenta um elevado poder fertilizante e corretivo, desde que se assegure que estas não apresentam potencial poluente<sup>[3]</sup>. Isto porque, para além da sua constituição em nutrientes e matéria orgânica, que trazem benefícios aos solos, as lamas também podem conter contaminantes como metais pesados, compostos orgânicos e agentes patogénicos<sup>[8, 9]</sup>.

Por outro lado, segundo um relatório da Comissão Europeia<sup>[9]</sup>, há evidências de que, desde meados dos anos 80, a concentração de metais pesados nas lamas provenientes de estações de tratamento de águas tenha diminuído devido ao maior controlo regulamentar relativamente ao uso e descarga de substâncias perigosas, a acordos voluntários e a práticas industriais, levando à cessação ou redução de emissões, descargas e perdas para o meio ambiente<sup>[9]</sup>.

A aplicação de lamas na agricultura promove vários benefícios agrónómicos, especialmente a reciclagem de nutrientes das plantas, como azoto e fósforo, o que faz com que este produto se torne um bom substituto para os fertilizantes químicos. Uma das vantagens ambientais mais reconhecida é a reciclagem de fósforo (P) na cadeia alimentar, que contribui para a conservação das reservas minerais de fósforo e reduz as entradas externas do cádmio (Cd) presentes em rochas fosfáticas. Por outro lado, as lamas também fornecem outros macronutrientes, tais como potássio e enxofre, e micronutrientes tais como cobre e zinco, necessários para as plantas. Os efeitos benéficos da aplicação de lamas no solo em relação à quantidade de matéria orgânica nele contida, às suas propriedades estruturais e à retenção da humidade, encontram-se também bem documentadas<sup>[9]</sup>.

Os solos portugueses, especialmente os do sul do País, apresentam valores de matéria orgânica reduzidos. Deste modo, é necessário contrariar a tendência para o enfraquecimento desta importante componente (solos) tentando, por exemplo, recorrer ao aproveitamento de resíduos orgânicos que contenham características que lhes permitam ter interesse agrícola<sup>[2]</sup>.

Para além da sua aplicação em terrenos agrícolas, as lamas provenientes de ETAR têm sido empregues com sucesso na silvicultura e nas operações de recuperação de terras, como, por exemplo, minas abandonadas ou aterros encerrados<sup>[9]</sup>.

Em termos de mudança climática e de emissões de gases com efeito estufa a partir das lamas recicladas na agricultura pensa-se que uma parte do carbono contido nestas lamas será sequestrado no solo, apesar de esta quantidade não ser considerada nos inventários nacionais de emissões de gases com efeito estufa<sup>[9]</sup>.

Em termos de poluição do ar, embora substitua a utilização de fertilizantes químicos e reduza as emissões de óxido nitroso associadas à sua utilização, só 20% do azoto contido nas

lamas aplicadas no solo é considerado como facilmente disponível para as plantas, fazendo com que as emissões de  $N_2O$  que ocorrem durante o seu espalhamento sejam maiores do que a redução de  $N_2O$  resultante do deslocamento do fertilizante <sup>[9]</sup>.

A deposição em aterro como outra possibilidade de destino final de lamas, para além das limitações legislativas, que cada vez serão mais apertadas, não permite tirar partido do valor fertilizante das lamas e constitui a alternativa de gestão menos desejável no âmbito da hierarquia de gestão de resíduos, de acordo com o Decreto – Lei nº 73/2011. A tendência de aplicação de limites legislativos cada vez mais apertados a este destino final pretende evitar a deposição de materiais recicláveis ou valorizáveis por outras vias, como é o caso dos resíduos orgânicos e, em particular, as lamas de ETAR <sup>[10]</sup>. Estas limitações, juntamente com a escassez de áreas disponíveis para deposição vão, também, promover um aumento exponencial dos custos de deposição <sup>[10]</sup>.

Dada a grande libertação de gases poluentes para a atmosfera e a produção de cinzas como subproduto, a incineração acaba por não ser uma opção ambientalmente sustentável <sup>[10]</sup>.

Para além disso, este processo não dá uso ao importante valor fertilizante das lamas, apresentando também custos elevados. Apesar disso, esta acaba por ser a solução mais utilizada para as lamas que não cumprem os valores-limite para aplicação em valorização agrícola <sup>[10]</sup>.

Como consequência, outras possibilidades que incluam o tratamento de resíduos orgânicos com a recuperação de recursos, têm sido testadas e aplicadas. A compostagem representa uma destas práticas <sup>[11]</sup>.

A compostagem é um processo aeróbio e termofílico de decomposição biológica da matéria orgânica em condições ambientais controladas e pela ação microbiana. Possibilita a redução de matéria volátil, a perda de água por evaporação, a ventilação acelerada e a higienização das lamas (eliminação de patogénicos), convertendo as lamas num composto orgânico <sup>[5, 11]</sup>.

Pode ainda ser visto, essencialmente, como o processo responsável pela decomposição da matéria orgânica na natureza, exceto pelo facto de ocorrer sob condições controladas <sup>[11]</sup>.

Uma das grandes vantagens deste processo é o facto de, após realizada a decomposição biológica dos resíduos orgânicos a tratar sob condições controladas, se obter um material humificado (composto) que pode ser manuseado com segurança, armazenado e aplicado no solo sem afetar adversamente o ambiente <sup>[11]</sup>.

Permite, também, a extinção de patogénicos, a redução de volume, a estabilização e a recuperação de recursos. Assim, os resíduos orgânicos devidamente compostados passam a ser esteticamente aceitáveis, livres de agentes patogénicos e fáceis de manusear. Podem, deste modo, ser utilizados para melhorar a estrutura de um solo, aumentar a sua retenção de água e fornecer nutrientes para o crescimento das plantas <sup>[11]</sup>.

Apesar de ainda alguns países da Europa não realizarem recolha seletiva de resíduos orgânicos em toda a sua extensão, tais como Portugal, Grécia, França, Irlanda e uma parte da Espanha, na sua maioria empreendem esforços significativos para recolha, separação e tratamento desta tipologia<sup>[12]</sup>. Em relação ao leque de tratamentos possíveis para esta tipologia de resíduos, nenhuma alternativa é “a mais viável” em relação às crescentes exigências ambientais, de mercado e legais para a qualidade do composto <sup>[12]</sup>.

A qualidade do composto mostra ser o elemento mais crítico quando se trata da sua colocação no mercado. Para o controlo deste parâmetro existe, em cada país, um sistema de garantia de qualidade, para o qual organizações independentes supervisionam, em intervalos regulares, as instalações de compostagem e respetivo produto. Aqueles que preenchem os requisitos continuamente obtêm um selo ou certificado de qualidade que pode ser utilizado como uma excelente ferramenta de marketing, captando a confiança dos compradores <sup>[12]</sup>.

A nível da União Europeia não existe nenhuma norma que defina a qualidade para o composto resultante do processo de compostagem. Alguns países da União Europeia regem-se por padrões de qualidade para determinado composto, mas não se verifica uniformidade nem para os parâmetros de avaliação, nem para os valores indicados.

No ano 2001 foi proposta no “*Working Document - Biological Treatment of Biowaste*” uma classificação para composto em função da concentração de metais pesados (crómio, níquel, cobre, zinco, cádmio, mercúrio e chumbo). Este documento pretende, também, promover o tratamento biológico de resíduos orgânicos através da harmonização das medidas nacionais relativas à sua gestão, a fim de prevenir ou reduzir qualquer impacto negativo sobre o meio ambiente, proporcionando assim um elevado nível de proteção ambiental. Também visa a proteção do solo assegurando que a utilização dos biorresíduos, tratados e não tratados, resulta em benefícios para a agricultura ou para a ecologia <sup>[13]</sup>.

Em Portugal foi apresentada por Manuel Gonçalves & Marco Baptista <sup>[14]</sup>, baseando-se no “*Working Document Biological Treatment of Biowaste*”, uma proposta de regulamentação sobre qualidade de composto para utilização na agricultura (Proposta de norma técnica sobre qualidade e utilizações do composto <sup>[14]</sup>). Após várias revisões, na última versão, de Dezembro de 2008, denominada “*Especificações Técnicas sobre a Qualidade e Utilizações do Composto*” <sup>[15]</sup>, são instituídas classes de qualidade para o composto, de acordo com alguns parâmetros, e



estabelecidos critérios para a sua utilização, bem como as restrições para evitar efeitos indesejáveis no solo, água, plantas, animais e seres humanos. Também, para além dos metais pesados, são indicados outros parâmetros como o grau de higienização, granulometria, pesquisa de germinação de infestantes e de partes de plantas com capacidade germinativa; e quais os resíduos que podem ser utilizados para a produção de composto. Ambos os documentos acima referidos, apesar de ainda se encontrarem em fase de discussão, são ferramentas fundamentais para a avaliação da qualidade do composto.

## **1.2 Objetivos**

Como objetivos gerais da presente dissertação podem nomear-se a aquisição de conhecimentos relativos ao processo de compostagem, designadamente dos resíduos recebidos pela Empresa Gintegral, S.A., e a avaliação do potencial interesse destes resíduos e projeto da sua aplicação no processo de compostagem a ser implementado.

Neste contexto, após o cumprimento dos objetivos gerais, foi desenvolvido o objetivo específico da realização desta dissertação, que se prendeu com o estudo e seleção de uma formulação adequada de mistura a utilizar no processo de compostagem, onde fossem integradas não só as lamas resultantes do tratamento de águas residuais, resíduos recebidos em elevada expressão pela empresa, mas também outros resíduos orgânicos rececionados, nomeadamente a silagem de milho, a ração de alimentação animal fora de prazo e cinzas de caldeira de biomassa. Após a formulação dessa mistura, e partindo dela, propusemo-nos a formular várias misturas de resíduos, variações da mistura inicial, com qualidade para serem integradas num processo de compostagem de pequena escala, em pilhas revolvidas, por forma a estudar e encontrar a melhor solução para integração na Central de Compostagem da Empresa, à escala Industrial.

## **1.3 Estrutura**

No presente capítulo, depois de apresentado o enquadramento geral do tema e formulados os objetivos propostos neste trabalho, serão referenciados os principais conceitos relativos ao processo de compostagem, bem como uma descrição geral do processo com referência às tecnologias, aos parâmetros usados no seu controlo e à avaliação qualitativa do composto final. Este capítulo contém, ainda, a revisão da literatura publicada sobre esta temática, bem como uma breve apresentação da empresa onde foi desenvolvido todo o trabalho experimental.

O segundo capítulo, Materiais e Métodos, refere, de uma forma pormenorizada, os materiais utilizados no processo estudado – matérias-primas, reagentes e materiais usados na análise do composto – e explica o método aplicado na construção e formulação das pilhas de compostagem. Neste capítulo é, também, realizada a descrição dos parâmetros usados para controlo do processo e das análises feitas para a determinação da qualidade do composto.

No terceiro capítulo, Resultados e Discussão, é apresentado o resultado da avaliação dos parâmetros controlados no decurso do processo, bem como o resultado das análises feitas ao composto final. Em seguida, é realizada análise crítica dos resultados obtidos no sentido de se conseguir atribuir uma classificação ao composto final.

No capítulo seguinte, capítulo quarto, intitulado Conclusão, faz-se o resumo e avaliação de todos os resultados obtidos e é apresentada uma proposta para trabalhos futuros. Por fim, surge a bibliografia e os anexos, que incluem documentos complementares ao trabalho realizado.

## 1.4 Compostagem

### 1.4.1 Conceitos

Haug, R. T.<sup>[16]</sup> define a compostagem como "*a decomposição biológica e estabilização de substratos orgânicos, sob condições que permitam atingir temperaturas termofílicas resultantes do calor produzido biologicamente, originando um produto final estável, isento de agentes patogénicos e de sementes e que traz benefícios quando aplicado ao solo.*".

Também Tchobanoglous, G. *et al.*<sup>[17]</sup> propõe uma definição semelhante descrevendo a compostagem como um processo onde a matéria orgânica sofre biodegradação até atingir um produto estável. Corbitt, R.A.<sup>[18]</sup> explica que a matéria orgânica é decomposta numa substância estável, através da atividade microbiana promovida durante a compostagem. Ao mesmo tempo, o calor produzido pode conduzir à destruição dos agentes patogénicos presentes.

O composto produzido neste processo conta com uma elevada abundância de nutrientes, tornando-se adequado para uma grande variedade de finalidades<sup>[19]</sup>. Materiais devidamente compostados podem ser utilizados como corretivos orgânicos para o solo e aplicados na agricultura e horticultura<sup>[17]</sup>. O composto, quando aplicado desta forma, permite melhorar significativamente as propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos, aumentando a capacidade de infiltração e retenção da água, especialmente em solos arenosos, tal como refere Santos, L.<sup>[20]</sup>, citando Biddlestone, A. *et al.*,<sup>[21]</sup> e Campbell, A. *et al.*<sup>[22]</sup>. Também dá lugar ao aumento do arejamento e da infiltração da água nos solos argilosos e à diminuição da sua densidade aparente<sup>[19]</sup>.

Os fatores que influenciam maioritariamente a velocidade de decomposição da matéria orgânica ao longo do processo de compostagem são o oxigénio e a humidade. Também a temperatura e os nutrientes, especialmente o carbono e o azoto, afetam este processo<sup>[23]</sup>. O composto proveniente do processo tem menor quantidade de azoto do que os resultantes de outros processos de estabilização, devido à perda de amoníaco durante a compostagem. No entanto, o azoto contido no composto é libertado mais lentamente e mantém-se disponível para as plantas durante um longo período de tempo, cobrindo as suas necessidades de absorção<sup>[19]</sup>.

Os métodos de pilhas estáticas arejadas e de pilhas revolvidas tem flexibilidade suficiente para lidar com mudanças nas características dos resíduos a compostar, exigem a utilização de equipamentos mecânicos relativamente simples e são de simples operação. Por outro lado, carecem de áreas relativamente grandes, produzem odores difíceis de controlar e

sofrem uma elevada influência da temperatura ambiente e das condições climatéricas. Já os processos fechados, em reator, requerem áreas relativamente pequenas e têm uma grande capacidade de controlo relativamente aos odores, mas apresentam uma flexibilidade bastante limitada para lidar com mudanças de condições e necessitam de uma manutenção intensiva [19].

### 1.4.2 Descrição Geral do Processo

O processo de compostagem pode ser subdividido em várias fases. Após a mistura dos materiais e a sua disposição em pilha (ou em reator, consoante o sistema selecionado) o processo é iniciado, atravessa uma fase ativa, na qual se distingue uma elevada quantidade de microrganismos termofílicos que degradam a matéria orgânica libertando calor, vapor de água,  $\text{CO}_2$  e outros gases, sendo finalizado por uma fase de maturação que possibilita a estabilização do composto (Figura 4). Estas várias fases podem ser distinguidas através das variações de temperatura [24].

Na última fase, como o processo se aproxima da conclusão, a atividade microbiana desacelera, sendo que, conseqüentemente, o material se aproxima da temperatura ambiente.

O composto resultante assume muitas das características de húmus, a fração orgânica do solo. Idealmente, o material terá reduzido de 20 a 60 % do seu volume, 40 % do seu teor de humidade e até 50 % do seu peso. Um dos principais desafios em compostagem é reter azoto, tanto quanto possível [24].



Figura 4 – Fluxo material do processo de compostagem convencional (Adaptado de Livestock Engineering Unit & Environmental Practices Unit [24]).

No gráfico representado na Figura 5 encontram-se esquematizadas as várias fases de temperatura atravessadas durante o processo de compostagem. Este gráfico expõe a descrição referida por Epstein, E. [23] que apresenta a compostagem e a maturação como dois processos distintos e separáveis, contrariamente ao que é normalmente encontrado na literatura.

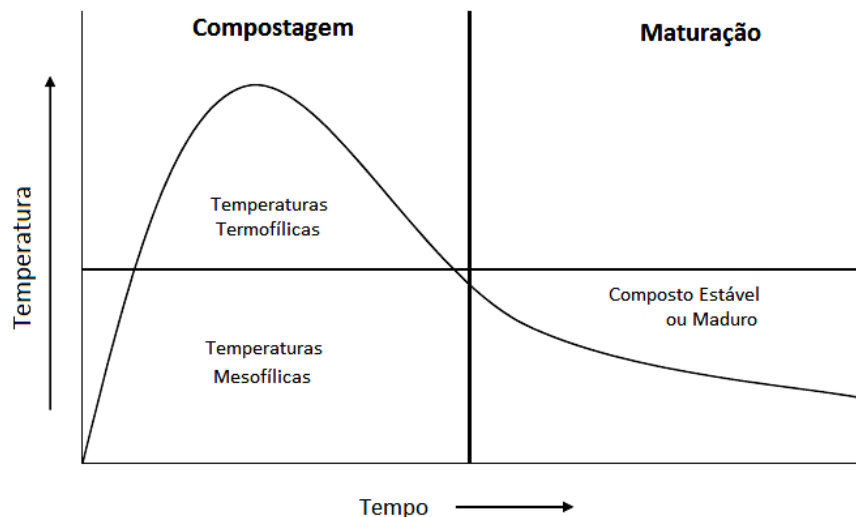


Figura 5 – Variações da temperatura ao longo do processo de compostagem (Adaptado de Epstein, E. <sup>[23]</sup>).

Geralmente, a curva característica do processo de compostagem é igual à apresentada, sendo que a fase nomeada na Figura 5 como compostagem é substituída por biodegradação, passando o conjunto “biodegradação e maturação” a fazer parte de um todo, esse sim denominado compostagem.

Autores como Turovskiy, I.S. e P.K. Mathai <sup>[19]</sup>, Kreith, F. e G. Tchobanoglous <sup>[25]</sup> definem a fase inicial, denominada como fase mesofílica, de forma idêntica. Nesta fase, que se inicia logo que as condições de compostagem são estabelecidas, ocorre um período de adaptação dos microrganismos presentes nos resíduos, na qual uma população diversificada de bactérias e fungos mesófilos começa a proliferar, degradando açúcares, amidos, celuloses simples e aminoácidos presentes no resíduo bruto (compostos mais simples) <sup>[25]</sup>. É nesta fase que se verifica a subida de temperatura da pilha de compostagem, desde a temperatura ambiente até cerca de 40 °C, devido à atividade microbiana acelerada <sup>[19]</sup>. Pode ser um período muito breve se os materiais forem altamente putrescíveis e se a mistura contiver resíduos frescos de jardim (resíduos verdes), ou um pouco mais lenta quando contém muitas folhas secas e resíduos resistentes, como palha, casca de arroz e serradura de madeira <sup>[25]</sup>.

Diaz *et al.* <sup>[26]</sup> refere que o número de organismos mesófilos no substrato original é de uma ordem de grandeza três vezes superior ao número de organismos termofílicos, mas só a atividade destes decompositores primários já induz um aumento de temperatura. Quando alcançada uma temperatura em torno dos 40 °C a atividade destes microrganismos mesófilos cessa, deixando de conter as funções vitais e as atividades fisiológicas capazes. Apenas sobrevivem os esporos com aptidão para resistir às elevadas temperaturas <sup>[27]</sup>.

Tal como refere Wilkinson, K.G. <sup>[28]</sup> citando Haug, R.T. <sup>[16]</sup>, a segunda fase, por ele considerada de uma forma mais simplificada como primeira fase de compostagem, é

caracterizada por elevadas temperaturas e taxas de decomposição, sendo usualmente denominada como fase termofílica ou como “*decomposição intensiva*”. O início desta fase dá-se por os organismos adaptados a temperaturas mais elevadas obterem gradualmente uma vantagem competitiva que lhes permite, no final, substituir quase inteiramente a flora mesofílica. As temperaturas recomendadas variam de autor para autor, sendo que as variações têm a ver com vários parâmetros, nomeadamente o tipo de material que está a ser compostado, e com a sua temperatura ótima de decomposição<sup>[23]</sup>. Geralmente as temperaturas variam entre 40 e 70 °C<sup>[17]</sup>. Essas condições levam à eliminação de odores incómodos e à destruição de agentes patogénicos e de sementes de plantas daninhas. É também nesta fase que as gorduras, hemicelulose e celulose começam a ser degradadas<sup>[16]</sup>.

Ao longo do processo de compostagem, os nutrientes disponíveis para os microrganismos vão sendo consumidos ou metabolizados, levando a um decréscimo da temperatura, aproximando-se cada vez mais da temperatura ambiente. Este fenómeno prova que a taxa de produção de calor é proporcional à matéria orgânica disponível para consumo microbiano. A redução da temperatura até à temperatura ambiente é uma indicação de que o processo se encontra quase completo e que o material está estável e maduro<sup>[23]</sup>. Esta é a fase de maturação do composto, na qual reaparecem os microrganismos mesófilos que, na forma de esporos, foram capazes de sobreviver às temperaturas atingidas na fase anterior e à ação dos microrganismos que nela se desenvolveram. O retorno destes microrganismos permite o alongamento do processo de degradação durante o tempo necessário para a obtenção de um composto final de qualidade apreciável<sup>[27]</sup>. Os processos metabólicos característicos desta fase propiciam a obtenção de coloides húmicos, estreitamente associados a elementos minerais, pela transformação de compostos orgânicos como a celulose e a lenhina<sup>[20]</sup>.

Tal como já foi referido, o processo de compostagem leva à produção final de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), água, minerais e matéria orgânica estabilizada (composto)<sup>[29]</sup>.

Na Figura 6 estão representadas, de modo esquemático, as várias fases do processo de compostagem, designadamente a decomposição, a maturação e a estabilização da matéria orgânica, bem como a variação de algumas das suas características ao longo dessas fases.

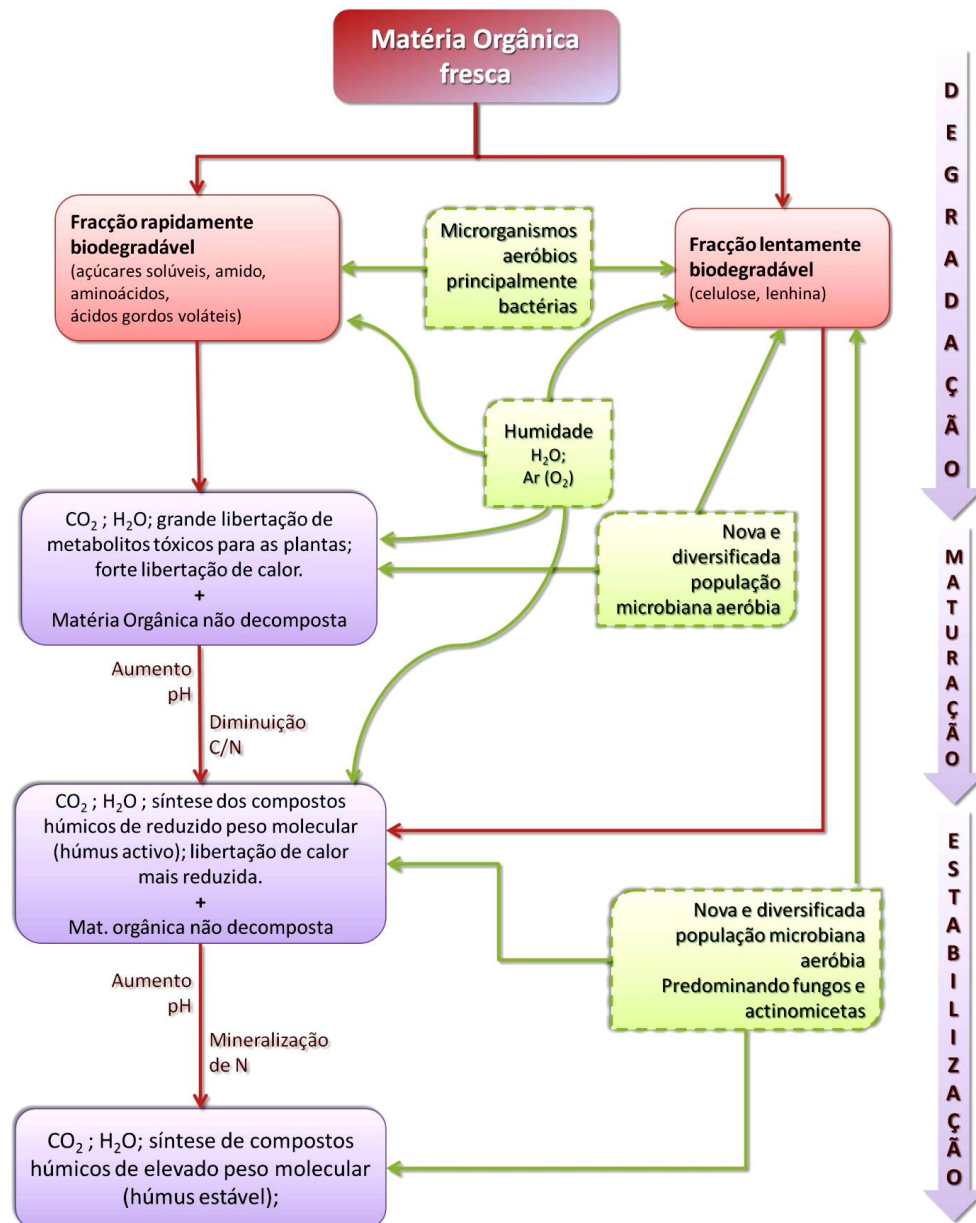


Figura 6 – Representação esquemática do processo de decomposição e estabilização da matéria orgânica (Adaptado de Gonçalves, M.S. <sup>[3]</sup>).

### 1.4.3 Tecnologias de compostagem

As tecnologias de compostagem são proliferamente referidas na bibliografia. Contudo, as classificações aplicadas apresentam pequenas variações.

Em seguida, na Figura 7, apresenta-se um dos esquemas de classificação mais comuns.





Figura 7 – Esquema resumo dos vários sistemas de compostagem (Adaptado de Epstein, E. <sup>[23]</sup>).

Grande parte das classificações distingue, à partida, sistemas abertos e sistemas fechados. Para além desta classificação, alguns autores, como Krogman e Körner <sup>[30]</sup>, separam os sistemas fechados dentro de pavilhões, mesmo que seja um sistema de pilhas revolvidas mas realizado no interior de um pavilhão, dos sistemas fechados em reator. Há, ainda, autores que sugerem que sejam conciliados sistemas fechados e abertos, no sentido de tornar o processo economicamente viável <sup>[25]</sup>. Os trâmites temporais destes processos são uma característica muito variável de autor para autor.

#### 1.4.3.1 Sistemas abertos

Os sistemas abertos podem ser divididos, de forma geral, em três tipos: pilhas de compostagem passiva, pilhas revolvidas e pilhas estáticas com arejamento natural ou forçado.

#### 1.4.3.2 Sistemas fechados

Os sistemas fechados são classificados de formas distintas por diferentes autores. Autores como Epstein, E. <sup>[23]</sup> e como Diaz, L. F. et al <sup>[31]</sup>, preferem uma classificação por direção do sistema. Deste modo, é dentro dos grupos "vertical", "horizontal" e "inclinado" que são distribuídos os vários sistemas existentes.

Já autores como Shammass, N. K. & Wang, L. K. <sup>[32]</sup> preferem a classificação em função da forma, separando os sistemas cilíndricos, retangulares, em túnel e em contentor. Só dentro destes grupos é que são separados os horizontais dos verticais.

Krogmann, U. & Körner, I. <sup>[30]</sup>, subdividem os sistemas fechados em sistemas com e sem reator, isto é, separam os casos em que a compostagem é realizada dentro de pavilhões

mas não está enclausurada num reator, daqueles em que isso acontece (veja-se descrição mais pormenorizada das Tecnologias de compostagem classificadas no Anexo I).

#### 1.4.4 Controlo do Processo

Para a realização do processo de compostagem é importante ter em conta alguns parâmetros. A definição desses parâmetros, as interações mais importantes e a sua influência são enumeradas e explicadas de seguida, sendo importante referir que os limites entre eles são difíceis de definir dado que se influenciam mutuamente (Figura 8).

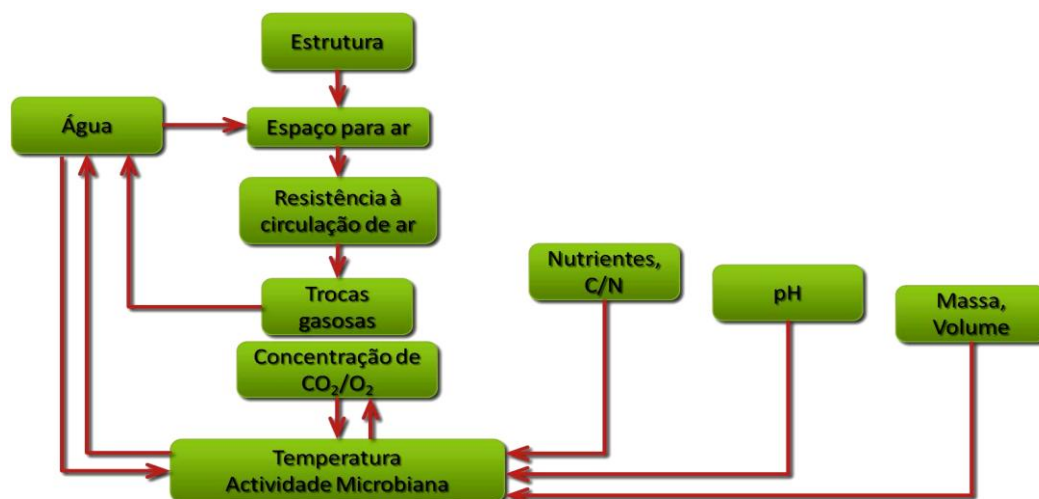


Figura 8 – Fatores que influenciam o processo de compostagem e as interações entre eles (Schuchardt, F. <sup>[33]</sup>).

##### 1.4.4.1 Microrganismos

O ecossistema do processo de compostagem, processo maioritariamente biológico, é muito variado e conta com a presença de diversos microrganismos <sup>[27]</sup>.

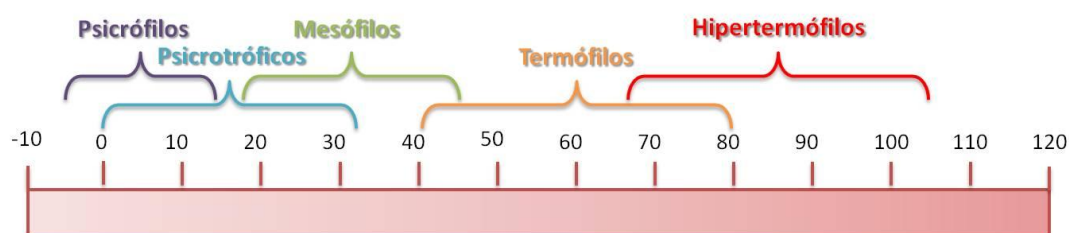
Tchobanoglous, G. *et al.* <sup>[17]</sup>, Turovskiy, I.S. e P.K. Mathai <sup>[19]</sup> definem os microrganismos envolvidos na compostagem subdivididos em três grupos distintos: bactérias, fungos e actinobactérias, que representam as populações mistas responsáveis pela degradação dos vários tipos de material presente.

Ao longo das fases de compostagem já anteriormente referidas é possível observar variação dos tipos de microrganismos. Na fase mesófila, as bactérias produtoras de ácido metabolizam os lípidos, os açúcares e as proteínas. Na fase termofílica, as bactérias termofílicas tornam-se ativas e continuam a metabolização as proteínas, lípidos e gorduras presentes e são responsáveis pela energia produzida e libertada em forma de calor. Os actinomicetes e os fungos estão presentes em ambas as fases mesofílica e termofílica e são responsáveis pela destruição de uma grande variedade de compostos orgânicos complexos e

da celulose <sup>[19]</sup>. Na fase de maturação final, o composto amadurece, através da atividade microbiana, para um produto ainda mais estável.

Segundo Kreith, F. e G. Tchobanoglous<sup>[25]</sup>, citando Golueke *et al.* <sup>[34]</sup>, faz sentido a divisão dos microrganismos em seis grupos que, por ordem decrescente de abundância, são as bactérias, actinomicetes, fungos, protozoários, vermes e larvas. Embora os actinomicetes sejam bactérias, são nomeados separadamente devido ao seu papel individual desenrolado na fase de maturação do processo. Os fungos rivalizam com as bactérias em termos de número e importância nas fases posteriores do processo. Os vermes presentes incluem os nematodes (ou vermes cilíndricos), algumas espécies de minhocas (anelídeos) e as larvas. No entanto, as minhocas e larvas aparecem só nas fases finais do processo de compostagem. Em termos de número e atividade, os organismos predominantes são bactérias e fungos, e, num grau muito menor, protozoários.

Na Figura 9 encontra-se um resumo esquemático dos intervalos de temperatura suportados pelos vários tipos de microrganismos, cada um deles descrito no Anexo II.



**Figura 9 – Representação esquemática dos intervalos de temperaturas suportados por cada tipo de microrganismos (Adaptado de Willey, J.M. *et al* <sup>[35]</sup>).**

Assim, é possível concluir que a variação dos tipos de microrganismos presentes ao longo do processo de compostagem vai depender das condições que encontrarem.

#### 1.4.4.2 Parâmetros Físicos

##### a. Temperatura

Tendo em conta que a compostagem pode ser considerada, na sua forma geral, como um processo microbiológico, e que qualquer metabolismo conduz a uma inevitável produção de calor, este é um parâmetro merecedor de bastante preocupação e controlo <sup>[27]</sup>.

A velocidade de decomposição, facto principal que influencia a produção de calor, depende de vários parâmetros, entre os quais a presença de oxigénio e a humidade, diretamente influenciados pelo arejamento realizado, a razão C/N dos materiais constituintes da mistura a compostar, a dimensão desses materiais, o tipo de cobertura da pilha de compostagem e a temperatura do ambiente onde a pilha está inserida <sup>[36]</sup>.

Segundo Insam, H. & M. Bertoldi <sup>[29]</sup>, na fase mesófila (25 – 40 °C) é possível definir uma relação linear entre o aumento da temperatura, devida à sobreposição de temperaturas ótimas de crescimento dos microrganismos a níveis inferiores a 30 °C (Figura 5), gama em que uma parte significativa dos microrganismos estão ativos, e a eficiência do processo e a sua velocidade. Já entre 35 e 55 °C, segundo Kreith, F. & G. Tchobanoglous <sup>[25]</sup>, ou 35 e 65 °C, conforme Insam, H. & M. Bertoldi <sup>[29]</sup>, dá-se a transição da fase mesófila para a fase termófila, que se deve não só ao envolvimento de diversos tipos de organismos, mas também à sua adaptação ou enriquecimento face às condições anteriores, que ocorre neste intervalo de temperatura. Quando a temperatura ultrapassa 55 °C, tanto a eficiência como a velocidade do processo de compostagem diminui, sendo que, acima de 70 °C, estes dois parâmetros podem até ser desprezados (aproximam-se de zero). Mas já a temperaturas superiores a 65 °C, os microrganismos formadores de esporos rapidamente entram na fase de esporulação e, como tal, estão num estado de dormência que promove o início de baixa de eficiência e velocidade. A maioria dos microrganismos não formadores de esporos acaba por morrer quando expostos a estas gamas de temperatura <sup>[25]</sup>.

Tal como referem J. Batista e E. Batista <sup>[27]</sup>, quando citam Paul e Clark <sup>[37]</sup>, a temperatura tem uma elevada influência, tanto na taxa de reações fisiológicas dos microrganismos, reguladas pela atividade microbiana que, por sua vez, é controlada pelas leis da termodinâmica, como nas características físicas e químicas do ambiente circundante. Uma vez que os microrganismos não possuem mecanismos de regulação da temperatura, quando a temperatura do meio muda, sofrem grandes modificações metabólicas. Aquando do consumo do oxigénio contido nos espaços intersticiais, o calor deixa também de ser produzido <sup>[27]</sup>. Mencionam também que as temperaturas entre 50 e 60 °C são consideradas as ótimas de compostagem, não se devendo permitir que se excedam a não ser a intervalos curtos, no máximo até 70 °C, para que seja possível suprimir todos os organismos patogénicos. Estas ordens de grandeza de temperatura são as que facultam “uma higienização do produto final, uma velocidade de decomposição rápida e uma humificação ativa” <sup>[27]</sup>.

Quando se dá o arrefecimento da pilha, depois de esta já ter atingido temperaturas termófilas, pode concluir-se que o processo de compostagem que nela ocorre está próximo do fim ou que a pilha em questão se tornou incapaz de manter condições aeróbias. Esta última possibilidade ocorre, normalmente, por falta de humidade ou de arejamento. A falta de arejamento, por sua vez, pode ocorrer como resultado de uma perda de estrutura e porosidade consequentes da decomposição do material<sup>[38]</sup>. Este é geralmente um dos problemas com as pilhas estáticas, não revolvidas durante o período de compostagem, bem como devido a compactação dos materiais. Como o material na pilha começa a decompor-se, a

pilha assenta, originando uma redução dos espaços de ar entre as partículas até ao seu fecho total, especialmente na zona da base que suporta um peso mais elevado, levando a que esta sofra um menor grau de decomposição do que a parte superior <sup>[38]</sup>. A resolução deste problema consegue-se com o revolvimento e mistura do material, devolvendo-lhe porosidade e entrada de oxigénio <sup>[38]</sup>.

A distribuição de temperaturas distintas dentro de uma pilha pode revelar uma mistura não uniforme de material e, conseqüentemente, levar à decomposição desigual dos resíduos. Já os pontos frios na mistura podem ser indício de locais de decomposição anaeróbia que têm o potencial para produzir os odores e compostos fitotóxicos <sup>[27]</sup>.

### **b. Humidade**

O teor de água é um parâmetro essencial para toda a atividade microbiana, sendo que ela deve estar presente em quantidades apropriadas e controladas ao longo do ciclo de compostagem <sup>[39]</sup>. O conhecimento do teor de humidade da mistura a compostar é indispensável, não só porque permite saber a quantidade de água nele contida, mas também porque possibilita a quantificação do ar existente <sup>[27]</sup>.

O teor de humidade ótimo para os materiais iniciais é bastante variável e depende, essencialmente, do estado físico e tamanho das partículas, e do sistema de compostagem aplicado <sup>[39]</sup>.

Este teor pode ser um fator limitante no processo de compostagem. Quando relacionado com a atividade microbiana, esta diminui quando o nível de humidade no composto se encontrar abaixo de 40 %, significando a desidratação do material inicial; e, torna-se essencialmente nula se atingir valores iguais ou inferiores a 20 %, resultando num composto fisicamente estável, mas biologicamente instável <sup>[39]</sup>. Já quando o conteúdo em humidade é superior a 60 %, os interstícios podem ser preenchidos por água, tornando reduzido o acesso do oxigénio a todo o material e, conseqüentemente, tornando-o num fator limitante da atividade microbiana, promovendo a sua diminuição <sup>[23]</sup>. Este último caso pode, também, favorecer processos anaeróbios, resultando num processo mais lento e numa má qualidade do produto final <sup>[39]</sup>, bem como na produção de maus odores <sup>[3]</sup>. Geralmente, as bactérias são microrganismos mais sensíveis à humidade do que os actinomicetes e os fungos <sup>[23]</sup>.

O teor de humidade de 60 %, considerado “máximo admissível”, é o valor mais elevado para o qual ainda não se desenvolvem condições de anaerobiose, permitindo ao processo prosseguir satisfatoriamente <sup>[39]</sup>. No entanto, deve sempre procurar-se a manutenção de um equilíbrio adequado entre a necessidade de água disponível e as trocas gasosas <sup>[39]</sup>.

Nos sistemas de compostagem mais modernos é frequente a adição de água durante o processo para controlo da humidade. Nas instalações de compostagem em funcionamento com elevados índices de geração de calor, pode ainda ser realizado algum tipo de arrefecimento. A adição de água periodicamente pode ser necessária para manter os níveis de atividade microbiana elevados, sendo que tem de ser conjugado com um processo de revolvimento mecânico <sup>[39]</sup>.

A perda de humidade durante o processo de compostagem é função do tipo de tecnologia utilizada, da temperatura e das condições ambientais. Por exemplo, a perda de humidade é mais acentuada quando são utilizados sistemas de revolvimento do que nos sistemas estáticos, uma vez que, aquando do arejamento, ocorre uma elevada perda de água. Quanto maior a temperatura na massa de compostagem, maior será essa perda de água <sup>[23]</sup>.

No final do processo de compostagem, já após a fase de maturação do composto, o teor de água deve ser bastante baixo (cerca de 30 %), no sentido de evitar qualquer atividade biológica adicional no material estabilizado <sup>[39]</sup>.

### **c. Arejamento**

Uma vez que a compostagem é um processo aeróbio, necessitando obrigatoriamente de oxigénio, torna-se necessário proceder ao arejamento, a partir do qual é promovida a chegada de oxigénio às várias camadas da pilha de compostagem. Tal como já foi referido, consoante o sistema de compostagem utilizado, o tipo de sistema de arejamento varia <sup>[23]</sup>.

Para procederem à degradação da matéria orgânica, os microrganismos precisam de certa percentagem de oxigénio (assunto abordado mais à frente no subcapítulo 1.4.4.3 - e - Taxa de respiração – Taxa de consumo de O<sub>2</sub>/formação de CO<sub>2</sub>). Quando o nível de oxigénio desce até um valor inferior a essa percentagem, os microrganismos anaeróbios começam a ultrapassar os aeróbios levando a que os processos de fermentação e a respiração anaeróbia passem a ser dominantes. Este ambiente redutor resulta também em compostos não oxidados na sua totalidade, tais como ácidos voláteis e metano (CH<sub>4</sub>) <sup>[36]</sup>. Deste modo, mostra-se importante que o fornecimento de oxigénio aos microrganismos seja constante para que estes mantenham as suas atividades metabólicas inalteradas. Assim, a ventilação torna-se indispensável no sentido de evitar estes fenómenos <sup>[39]</sup>.

Por outro lado, o arejamento também promove a secagem, removendo a humidade e o calor, e, conseqüentemente, diminuindo a temperatura da massa de compostagem <sup>[36]</sup>.

A variação de temperatura na pilha pode ser bastante elevada, tomando valores distintos de zona para zona, podendo apresentar um diferencial de temperatura de cerca de 30 °C desde o centro (zona mais quente) até à camada superficial (zona menos quente) e tornando muito importante o seu revolvimento regular. Deste modo é possível que cada parte

do substrato que se encontra a uma temperatura inferior (camadas exteriores) seja movida para a parte mais quente da pilha (centro). De um ponto de vista microbiológico, tendo em conta a temperatura e o fornecimento de oxigénio, podem ser identificadas quatro zonas principais dentro de uma pilha<sup>[29, 40]</sup>, as quais se encontram representadas na Figura 10.

A zona exterior (A) é a mais fresca, e conta com uma elevada abundância de oxigénio, contrariamente à zona mais interior (B) que conta com um mau fornecimento de oxigénio. A zona inferior mais superficial (C) apresenta temperaturas medianamente elevadas e é bem fornecida com oxigénio, enquanto a zona superior (D) é a zona mais quente, sendo que, geralmente, conta com um abastecimento considerável de oxigénio<sup>[29]</sup>.

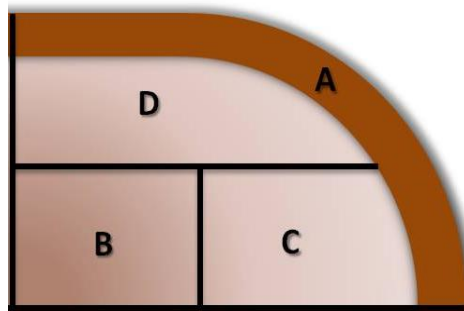


Figura 10 – Secção transversal de uma pilha de compostagem (Adaptado de Insam, H. e M. Bertoldi<sup>[29]</sup>).

No processo de compostagem a degradação microbiológica em condições aeróbias, também denominada como respiração, promove a conversão da matéria orgânica em água, CO<sub>2</sub>, compostos inorgânicos e matéria húmica. A atividade respiratória está diretamente relacionada com a oferta endógena de material degradável. A quantificação desta atividade pode ser realizada tanto pela determinação do consumo de O<sub>2</sub> como pela produção de CO<sub>2</sub><sup>[29]</sup>.

#### d. Odores

Odor é a propriedade de uma substância química ou mistura de substâncias que, dependendo da concentração, dispara o sentido de cheiro e assim é capaz de causar uma sensação de odor<sup>[41]</sup>.

A emissão de odores é um dos principais problemas no planeamento de uma instalação de compostagem, uma vez que é muito difícil projetar e construir um processo de compostagem sem a liberação de substâncias odoríferas. As principais fontes de odores são a matéria-prima (resíduos orgânicos), os produtos metabólicos que surgem durante a degradação aeróbia, e alguns dos produtos metabólicos formados durante a degradação anaeróbia que possa acontecer por desregulação do processo. Outro fator que regula a formação de odor é o método de funcionamento da instalação de compostagem<sup>[41]</sup>.

O odor é um indicador importante do processo de compostagem, pelo que devem ser tidas em conta características como o seu tipo e intensidade. Os tipos e as intensidades de odor que a massa de compostagem emana podem revelar insuficiências em fatores operacionais e ambientais, bem como deficiências na quantidade de degradação, na estabilidade, ou na qualidade do produto final. Deste modo, um odor desagradável geralmente indica anaerobiose e necessidade de ajuste das condições de funcionamento do processo, de tal forma que a disponibilidade de oxigénio seja aumentada. Se o arejamento realizado foi insuficiente devido a humidade excessiva, o aumento da sua intensidade vai permitir a secagem da massa de compostagem na medida necessária para promover as condições de aerobiose desejadas.

Contudo, deve referir-se que a obtenção de um odor semelhante ao de terra não indica necessariamente decomposição suficiente, estabilidade ou maturidade. Isto é, a suficiência da degradação de uma substância tóxica orgânica aromática é evidenciada pelo desaparecimento do seu odor característico. Assumindo a presença de uma população microbiana capaz de degradar os compostos tóxicos, a taxa e extensão de desaparecimento do componente aromático são indicadores da eficiência do processo de compostagem. No entanto, a perda completa da substância aromática e a obtenção de estabilidade de outros componentes da massa de compostagem não são necessariamente coincidentes <sup>[42]</sup>.

O conhecimento das emissões de odor de cada processo de compostagem, independentemente da matéria-prima, bem como a possibilidade de evitar estas emissões, é condição prévia fundamental para uma compostagem bem-sucedida. É sempre muito difícil prever com precisão as emissões de odores de qualquer instalação de compostagem <sup>[41]</sup>.

Sendo que o odor é um parâmetro que não pode ser quantificado por medições físicas ou químicas (podem apenas ser quantificados os compostos causadores de odores, , a sua previsão é sempre pouco precisa <sup>[41]</sup>.

A avaliação de emissões de odor baseia-se tipicamente em valores experimentais reunidos em processos de compostagem semelhantes. No entanto, a inferência das emissões duma instalação para outra é difícil, uma vez que as condições limitantes raramente são as mesmas. Condições diversas, tais como fluxo de entrada de resíduos e sua composição, tipo de tecnologia de compostagem, tempo, temperatura do material em decomposição, e muitas outras variáveis, devem ser especialmente consideradas para evitar uma má interpretação dos tipos e níveis de emissões <sup>[41]</sup>.

Relativamente aos diversos materiais a compostar e à sua tendência para a produção de odores, podem distinguir-se, por exemplo, as lamas em bruto e as lamas digeridas, sendo que as primeiras, uma vez que têm maior percentagem de material orgânico, levam a maior intensidade de odores libertados. Para o controlo destes odores indesejáveis são empregues



vários métodos, o mais utilizado sendo a adição de cal (CaO) que altera o pH do material; de acordo com Turovskiy & Mathai <sup>[19]</sup>, a matéria orgânica perde o seu odor quando o pH das lamas é elevado do seu valor típico de 5,5 a 6,5 para 10,0 a 10,5 <sup>[19]</sup>.

A hidratação da cal (absorvendo a humidade da lama) faz com que se liberte calor para a mistura de compostagem. Segundo Turovskiy & Mathai <sup>[19]</sup>, durante o processo de hidratação de 1 kg de cal quimicamente pura (100 % de CaO), são absorvidos cerca de 320 g de humidade da lama e produzidos 1152 kJ de calor. Esta libertação de calor promove uma redução global no tempo de compostagem, uma vez que encurta o período de tempo da fase mesofílica (25 a 40 °C), dirigindo mais rapidamente o processo para a fase de termofílica (55 a 65 °C) <sup>[19]</sup>. Para além de aumentar o pH, absorver a humidade e libertar o calor, a cal também se liga aos metais pesados que podem estar presentes no resíduo, o que promove um melhor ambiente para o crescimento dos microrganismos necessários para o processo de compostagem <sup>[19]</sup>.

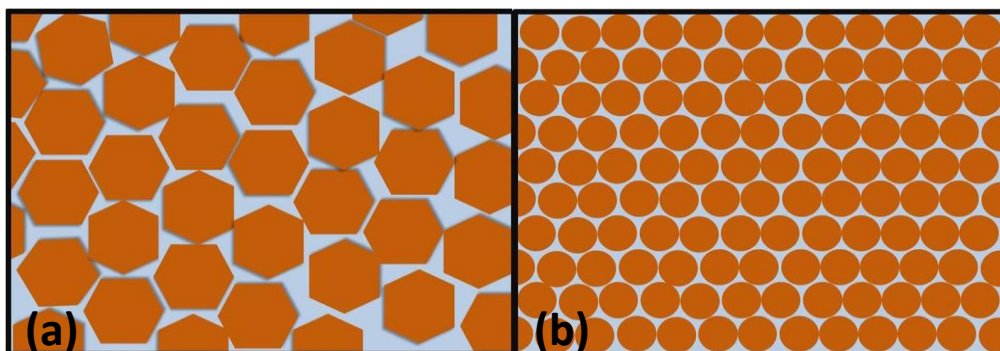
#### **e. Estrutura e Granulometria**

A atividade microbiana ocorre na interface entre a superfície das partículas com o ar, onde a difusão de oxigénio nos filmes aquosos que as cobrem é adequada para a ocorrência de metabolismo aeróbio <sup>[27]</sup> <sup>[43]</sup>. Com o aumento da área de superfície exposta, é possível uma mais rápida digestão dos materiais pelos microrganismos e consequente multiplicação e geração de calor. Os resíduos vegetais picados, aparas de madeira mole e serradura são exemplos de materiais que não necessitam de redução de tamanho <sup>[43]</sup>.

O aumento de área de superfície dos materiais pode ser obtido por trituração, granulação ou moagem. Para este efeito encontra-se disponível uma ampla gama de trituradores e picadores, facilmente manuseáveis, desde modelos de grande capacidade até mais pequenos <sup>[43]</sup>.

A fragmentação excessiva pode também impedir a circulação do ar pela diminuição do tamanho dos poros e pela compactação do material <sup>[43]</sup>. Na Figura 11 estão representadas 2 distribuições granulométricas: na Figura 11 (a) não ocorre compactação de material devido à granulometria mais elevada, que mantém uma quantidade de poros substancial; contrariamente, na Figura 11 (b), com granulometria inferior, a quantidade de poros livres para a circulação de ar será menor.

O revolvimento do material é uma das formas de aumentar a sua porosidade, bem como a adição de materiais grosseiros, tais como palha ou lascas de madeira. Por outro lado, esta tipologia de materiais será decomposta mais lentamente <sup>[43]</sup>.



**Figura 11 – Ilustração da diferença dos espaços intersticiais onde pode circular a água consoante a granulometria das partículas (a) maior granulometria; (b) menor granulometria.**

Um agente estruturante, tal como o nome indica, é um material usado para melhorar a estrutura da mistura controlando o teor de humidade ou fornecendo porosidade à matéria-prima. Este material pode ser orgânico ou inorgânico e proporciona um suporte estrutural que melhora o arejamento ou o movimento de ar através da matriz. Por exemplo, muitas das lamas de esgoto, lamas de ETAR, ou adubos, têm uma consistência pastosa. Estes materiais têm de ser convertidos num material mais poroso para que o ar circule no seu interior. Se a matéria-prima é muito húmida (superior a 65 %), pode adicionar-se serradura ou composto maduro e seco para reduzir o teor de humidade, o que não confere porosidade suficiente à mistura. A porosidade necessária pode obter-se pela adição de um agente estruturante orgânico ou inorgânico, tal como aparas de madeira ou aparas de pneus de borracha. Os agentes estruturantes podem ser degradados conjuntamente com a matéria-prima ou removidos no final do processo e depois reutilizados <sup>[23]</sup>.

Epstein, E. <sup>[23]</sup> refere alguns agentes estruturantes muito usados, tais como aparas de madeira, cascas de arroz, palha, bagaço, jacintos de água, resíduos de jardim, aparas de árvores, borracha desfiada, resíduos agrícolas, resíduos peletizados e cascas de amendoim <sup>[23]</sup>.

Estes agentes estruturantes são muitas vezes necessários para possibilitar o processamento das matérias-primas de uma forma aeróbia e eficiente <sup>[23]</sup>.

Um agente corretor, em contraste, é um material adicionado à matéria-prima no sentido de melhorar o processo, ou ao produto final, aumentando o seu valor. Se a relação de carbono/azoto da matéria-prima é muito elevada (superior a 60:1), pode ser necessário uma fonte de azoto para acelerar o processo, a qual pode ser estrume, aparas de relva ou uma fonte inorgânica. A adição de um “corretor” torna-se muito interessante quando permite aumentar o valor final do produto como, por exemplo, se a um composto final com cerca de 3 % de azoto for adicionada uma fonte de azoto aumentando a quantidade de azoto para cerca de 5 %, e, portanto, qualificando-o como um fertilizante e como um condicionador do solo <sup>[23]</sup>. Estes agentes têm vários objetivos, entre os quais o ajuste de humidade da matéria-prima, o

fornecimento de porosidade à matriz, o ajuste da proporção carbono/azoto, a melhoria da qualidade dos produtos e a estabilidade estrutural que possibilita o empilhamento e armazenamento <sup>[23]</sup>.

A porosidade refere-se aos espaços entre as partículas na pilha de composto. Se um material se encontrar saturado, esses espaços vão estar ocupados por água, não permitindo a circulação de ar. Pelo contrário, se os poros não estiverem saturados, vão passar a estar parcialmente cheios de ar, possibilitando o fornecimento de oxigénio aos organismos decompositores (Figura 12) <sup>[43]</sup>.

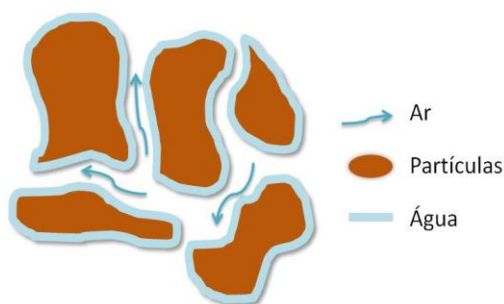


Figura 12 – Esquema da circulação de ar e água numa massa de resíduos em compostagem (Adaptado de Epstein, E. <sup>[44]</sup>).

O teor de humidade e porosidade da matriz estão, desta forma, inter-relacionados. Uma vez que a compostagem é um processo de decomposição aeróbia, em contraste com a digestão anaeróbia, o oxigénio tem de ser fornecido e estar disponível para os microrganismos aeróbios <sup>[23]</sup>.

#### 1.4.4.3 Parâmetros Químicos

Os três componentes químicos principais da matéria-prima do processo de compostagem que podem afetar a utilização do composto final são os nutrientes, os metais pesados e os sais.

Os nutrientes mais importantes para as plantas são o azoto (N), o fósforo (P) e o potássio (K) <sup>[23]</sup>. O azoto presente no composto está maioritariamente na sua forma orgânica. O azoto orgânico não é solúvel e, conseqüentemente, não é lixiviado através do solo, nem está disponível para as plantas. Para o azoto ficar disponível para as plantas, é necessário que seja mineralizado, isto é, convertido para uma forma inorgânica, solúvel, de amónia ( $\text{NH}_4^+$ ) e de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) <sup>[23]</sup>.

Já em relação aos metais pesados, a maioria das matérias-primas do processo de compostagem é pobre nestas substâncias, o que não invalida a importância da verificação da sua existência no composto orgânico final, dada a sua perigosidade <sup>[23]</sup>.

Os níveis de sal também podem levar a problemas significativos na utilização do composto. Lamas de resíduos alimentares e de águas residuais são duas das matérias-primas que podem conter níveis elevados de sais solúveis. Sais altamente solúveis no composto podem resultar no crescimento de plantas prejudiciais ou na fitotoxicidade do composto. Certas plantas são mais sensíveis aos sais que outras. O teor de sal solúvel, tal como medido por condutividade elétrica, pode afetar grandemente a germinação e o crescimento da planta [23]. Epstein, E. [44] considera que a condutividade elétrica acima de  $5 \text{ mS.cm}^{-1}$  pode levar à fitotoxicidade. Quando se sabe que a matéria-prima tem uma condutividade elétrica inicial elevada, como por exemplo no caso dos resíduos sólidos urbanos ou lamas de estação de tratamento de águas residuais, o ideal será incorporar um agente estruturante com baixo teor em sal ou outra matéria-prima com a mesma característica. Para contornar os possíveis teores elevados de sal no composto este pode ser comercializado para utilização em plantas tolerantes ao sal. Por outro lado, se o destino do composto for culturas não tolerantes, o teor elevado de sal pode ser reduzido por lixiviação ou por diluição do composto com outro de baixo teor de sal [23].

#### **a. Nutrientes**

Para os microrganismos os componentes da alimentação considerados fundamentais são o carbono (C), o azoto (N), o fósforo (P) e o potássio (K), também designados por macronutrientes. Consideram-se micronutrientes o cobalto (Co), o manganês (Mn), o magnésio (Mg) e o cobre (Cu), entre outros elementos. O cálcio (Ca) situa-se algures entre estes dois grupos de nutrientes, apesar da sua principal função ser, provavelmente, a de tampão, isto é, um elemento que promove e facilita a resistência às mudanças de pH [39].

Na compostagem, tal como para qualquer outro processo biológico, existe um substrato a degradar, que neste caso é o resíduo a ser compostado, cujas características químicas e físicas são críticas para a viabilidade do processo (em termos de curso e velocidade). Essencialmente é a disponibilidade, a concentração e o equilíbrio dos nutrientes para os microrganismos, que dita a viabilidade do processo de compostagem [39].

Um dos grandes problemas nutricionais do processo de compostagem é o facto de, apesar dos nutrientes se encontrarem em elevadas concentrações no substrato, não se apresentarem numa forma diretamente assimilável pelos microrganismos, ou seja, embora presentes não estão disponíveis [39].

Assim, é fundamental ter em conta que a disponibilidade de nutrientes é função da composição enzimática de cada microrganismo individual, uma vez que a decomposição e, consequentemente, o processo de compostagem de resíduos, resulta da atividade de uma

sucessão dinâmica dos diferentes grupos de microrganismos em que um grupo prepara o caminho para o seu grupo sucessor<sup>[39]</sup>.

Existem grupos de microrganismos, como os que podemos encontrar nos resíduos frescos, que contêm um complexo enzimático capacitado para atacar, degradar e utilizar a matéria orgânica; e outros, com capacidade para utilizar apenas alguns produtos de decomposição (intermediários) como fonte nutricional<sup>[39]</sup>.

Outro aspeto importante da disponibilidade de nutrientes na compostagem é a resistência das moléculas orgânicas à degradação, mesmo que os microrganismos em questão possuam o complexo enzimático necessário. Consequentemente, tais materiais são degradados lentamente, mesmo com todas as outras condições ambientais mantidas num nível ótimo. Alguns desses materiais representados na Tabela III – 1 (Anexo III) são a lignina (madeira) e quitina (penas, mariscos, exo-esqueletos)<sup>[39]</sup>.

- **Razão C/N**

As variações relativas à perda de matéria orgânica biodegradável durante o processo de compostagem dependem de vários fatores, entre os quais o sistema de compostagem, a duração processo, o sistema de arejamento, a qualidade (física e química) da matéria orgânica, o tamanho das partículas, as variações de temperatura que nele ocorrem e a razão C/N<sup>[29]</sup>.

Para além disso, no sentido de realizarem as suas funções vitais (como o crescimento, regulação e reprodução), os microrganismos requerem quantidades mínimas de elementos químicos constituintes da sua estrutura e necessários para as suas funções<sup>[27]</sup>.

O carbono é utilizado essencialmente como fonte de energia ou unidade estrutural básica das moléculas orgânicas, promovendo desta forma o crescimento microbiano<sup>[27, 38]</sup>. Quando presente em condições aeróbias, uma parte do carbono é libertado na forma de dióxido de carbono, sendo o restante combinado com azoto durante o processo de crescimento microbiano. A libertação deste nutriente como dióxido de carbono é mais elevada ao longo da fase termofílica. Deste modo, o teor em carbono de uma pilha de compostagem é decrescente ao longo do processo de compostagem. Após a fase de maturação, a quantidade de carbono no composto decresce cerca de 30 – 50 %, pela sua decomposição e consequente produção de, fundamentalmente, dióxido de carbono, vapor de água e matéria parcialmente degradada, para obtenção de energia, e a sua utilização no desenvolvimento celular, conjuntamente com o azoto<sup>[38]</sup>.

Já o azoto representa um papel bastante importante na composição de alguns elementos essenciais para o crescimento e funcionamento das células como proteínas, ácidos nucleicos, aminoácidos, enzimas e coenzimas<sup>[27]</sup>.

Os autores Martins e Dewes <sup>[45]</sup> concluíram que cerca de 48,6 a 77,4 % das perdas de azoto durante a compostagem se deviam a emissões gasosas, sendo que grande parte destas são constituídas por amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), podendo também conter uma pequena percentagem de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ).

As transformações sofridas pelo azoto durante o processo de compostagem são semelhantes às que acontecem na natureza. Na compostagem, as três fases mais importantes são a mineralização, a nitrificação e a assimilação. Tanto a assimilação redutora de nitratos, como a conversão efetuada no interior das células microbianas para compostos de azoto orgânico, representam etapas importantes no processo de compostagem, no sentido de reduzir as perdas de azoto no composto e no solo <sup>[29]</sup>.

O carbono e o azoto são nutrientes necessários e constituem a fonte de energia para o crescimento dos microrganismos <sup>[44]</sup>.

Segundo J. G. F. Batista e E. R. B. Batista <sup>[27]</sup>, no decorrer de um processo de decomposição aeróbia ativa, o consumo de carbono pelos microrganismos é cerca de 15 a 30 vezes mais elevado do que o de azoto. Também Epstein, E. <sup>[44]</sup> refere que, normalmente, os microrganismos utilizam uma parte de azoto (N) para cada 30 partes (em peso) de carbono (C), o que sugere que esta razão de C/N (30:1) seja a mais desejável para uma compostagem eficiente. Em termos gerais, razões C/N entre os 25 e os 35 promovem melhores condições para a compostagem <sup>[46]</sup>. O tipo de carbono referido nesta proporção é o carbono biodegradável. A diminuição da razão C/N potencia a perda de azoto por volatilização na forma de amoníaco e o seu aumento conduz a tempos de compostagem progressivamente maiores, dado que o azoto se torna limitante para a velocidade de crescimento <sup>[44]</sup>.

Tal como já foi referido anteriormente, os microrganismos requerem certos nutrientes em grandes quantidades e, neste sentido, as quantidades relativas de carbono e de azoto presentes têm um efeito considerável sobre o processo de compostagem, sendo por isso utilizadas como indicadores primários do conteúdo de nutrientes. Os fenómenos químicos que ocorrem no processo de compostagem baseiam-se no equilíbrio de materiais carbonáceos e azotados contidos na mistura. A proporção de carbono e azoto é uma característica nutritiva muito importante porque, quando estes elementos existem nos valores adequados, os restantes nutrientes tendem a estar presentes em quantidades aceitáveis <sup>[38]</sup>.

## **b. Metais Pesados**

A designação “metais pesados” deve-se principalmente à sua posição na tabela periódica, isto é, são elementos que na sua forma elementar apresentam um elevado peso atómico, contando-se cerca de 40 elementos. Quando absorvidos pelo organismo humano, cada um destes metais tende a acumular-se num órgão específico <sup>[44]</sup>. O cádmio (Cd), crómio

(Cr), cobre (Cu), chumbo (Pb), mercúrio (Hg), níquel (Ni) e zinco (Zn) fazem parte deste grupo de metais. Mas, dadas as suas diferentes características, nem todos estes elementos apresentam o mesmo impacto no ser humano. Alguns têm uma determinada função biológica (oligoelementos ou micronutrientes) e são necessários, em pequenas quantidades, para plantas e animais, fundamentalmente para que os organismos completem o ciclo vital. Neste grupo encontram-se o crómio, cobre, níquel e zinco <sup>[44]</sup>. Pelo contrário, alguns metais pesados, como o cádmio, o mercúrio e o chumbo, quando em elevada quantidade no organismo, provocam doenças, são tóxicos e apresentam tendências acumulativas <sup>[44]</sup>.

A potencial libertação de metais pesados tóxicos para o meio ambiente e a sua transferência do solo para a cadeia alimentar são geralmente considerados os efeitos negativos mais relevantes da utilização de composto <sup>[47]</sup>.

Uma vez que o comportamento dos metais pesados no solo é semelhante ao seu comportamento no composto, torna-se possível a avaliação dos seus efeitos e sua mobilidade no composto. Sendo que a concentração de metais pesados no composto é normalmente maior do que a concentração normal no solo, se não houver qualquer tipo de intervenção é provável que venha a ocorrer a sua acumulação no solo, promovendo efeitos negativos, nomeadamente na qualidade da água e na cadeia alimentar <sup>[47]</sup>.

Por isso, estes elementos precisam de ser controlados dado que podem ser prejudiciais não só para os seres humanos, mas também para os animais, plantas e ambiente <sup>[44]</sup>. A concentração dos metais pesados no composto pode depender da composição das matérias-primas usadas no processo de compostagem, da contaminação dos diferentes tipos de resíduos ou da lixiviação de resíduos metálicos, realizada por ácidos orgânicos produzidos durante o processo de compostagem. Para lidar com o problema é particularmente importante determinar a origem destes elementos nos resíduos <sup>[44, 47]</sup>. Este fenómeno é mais frequente em compostos produzidos a partir de resíduos urbanos, uma vez que a variabilidade da sua composição é considerável e a natureza dos resíduos depende de contextos geográficos e sociais. Uma seleção apropriada dos resíduos provenientes de uma recolha seletiva pode, deste modo, reduzir substancialmente os riscos derivados da existência de metais pesados <sup>[47]</sup>. Para além disso, o solo e as plantas já apresentam uma determinada quantidade de metais pesados <sup>[44]</sup>.

O aumento da concentração de metais pesados na fase líquida existente no solo aumenta a absorção vegetal e a lixiviação, mas os riscos ambientais podem ser drasticamente reduzidos se os metais forem retidos na fase sólida do solo. Este problema é particularmente importante na distribuição de composto sobre a terra, tanto na utilização agrícola como na eliminação para aterro <sup>[47]</sup>. Como o solo é um elemento de inserção dos metais pesados na

cadeia alimentar, é essencial estudar o comportamento dos metais e a variação desse comportamento na sua composição química. A distribuição dos metais pesados no solo é controlada por uma série complexa de reações de equilíbrio dinâmico, influenciada pelas características físicas, químicas e biológicas do solo, pelas características do composto, pelas condições climáticas e pelas técnicas agronómicas utilizadas <sup>[47]</sup>.

Os principais fatores que afetam o comportamento ambiental dos metais pesados no solo são o pH, a capacidade de troca catiónica, a matéria orgânica, a água e o regime térmico do solo <sup>[47]</sup>. Os locais específicos de adsorção dependem do pH, sendo que qualquer aumento da acidez reduz o número de sítios disponíveis para os metais pesados <sup>[47]</sup>.

Os complexos de metais pesados com matéria orgânica do solo podem ser subdivididos em função da sua solubilidade, o que determina a sua mobilidade ambiental (Figura 13).

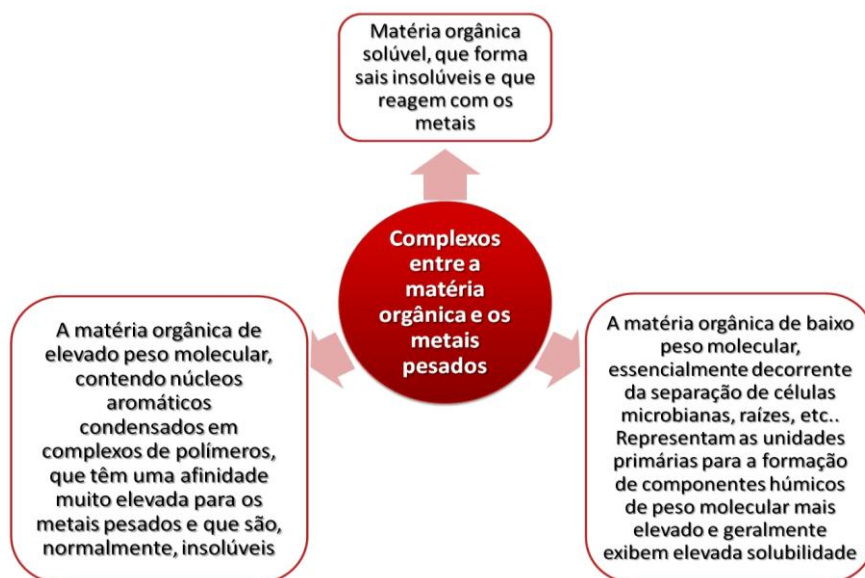


Figura 13 – Complexos formados entre a matéria orgânica e os metais pesados (Adaptado de Tittarelli, F. *et al* <sup>[47]</sup>).

### c. Micropoluentes orgânicos

A presença de contaminantes orgânicos nas lamas de ETAR tem sido considerada em maior extensão nos últimos anos <sup>[48]</sup>. A lista de potenciais contaminantes detetados é cada vez mais extensa e inclui: produtos de combustão incompleta (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP), Policlorobifenilos (PCB) e dioxinas), solventes (parafinas cloradas), retardadores de chama (como éteres), plastificantes (ftalatos), produtos químicos agrícolas (como por exemplo pesticidas), resíduos de detergentes, produtos farmacêuticos (como antibióticos, hormonas endógenas e sintéticas, etc.) <sup>[49]</sup>.



OS PCB e os HAP são, em relação ao processo de compostagem, os dois grupos de micropoluentes mais frequentes e preocupantes dentre os vários contaminantes orgânicos. Para além de apresentarem um acentuado potencial cancerígeno e mutagénico, são substâncias muito persistentes, que não se degradam ou diminuem significativamente durante o processo de compostagem, ameaçando deste modo a saúde humana <sup>[50]</sup>.

No entanto, segundo *Smith, S. R.* <sup>[48]</sup>, o controlo de emissões internacionais sobre as principais fontes pontuais destes compostos persistentes reduziram significativamente a sua entrada no ambiente e, conseqüentemente, no sistema de recolha de águas residuais urbanas.

Também no relatório elaborado por Erhardt, W., & Prueß, A. <sup>[51]</sup>, os contaminantes orgânicos presentes nas lamas não representam grandes problemas para a saúde da população humana quando são aplicadas para fins agrícolas. Estes contaminantes, quando em comparação com a contaminação de lamas por metais pesados, mostram-se muito menos prejudiciais para a saúde humana.

- **Policlorobifenilos (PCB)**

Os policlorobifenilos são normalmente provenientes de duas fontes: ou são fabricados por cloração de bifenilos, e utilizados como líquidos hidráulicos (óleos hidráulicos), emolientes para materiais sintéticos, lubrificantes, agentes de impregnação para madeira e papel, e como suportes para inseticidas; ou são provenientes de processos de combustão, de instalações de incineração, da queima de combustíveis fósseis, entre outros processos de combustão incompleta <sup>[52]</sup>.

- **PCDD/PCDF**

Segundo o relatório realizado pela I. C. Consultants Ltd <sup>[52]</sup>, as três principais fontes de policlorodibenzodioxinas e policlorodibenzofuranos são: as reações ou processos químicos nos quais as dioxinas surgem como subprodutos indesejáveis a partir da produção ou a utilização dos compostos organoclorados; a combustão (processos térmicos), em que as dioxinas surgem por processos térmicos em instalações como fundições de ferro, instalações de incineração e processos de combustão incompleta de metano em aterros, motores a gasolina e diesel, etc. e são libertados na atmosfera; ou podem ser resultado de processos de combustão incompleta envolvendo cloro <sup>[52]</sup>.

Os PCDD e PCDF podem também ser formados e libertados na atmosfera por fenómenos naturais, como por exemplo incêndios florestais <sup>[52]</sup>. Os efluentes provenientes das máquinas de lavar a roupa são uma das principais fontes de dioxinas nas águas residuais domésticas <sup>[52]</sup>.

- **Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (HAP)**

Estes representam uma família de compostos orgânicos com dois ou mais anéis aromáticos fundidos que apresentam uma solubilidade relativamente baixa em água, mas são altamente lipofílicos <sup>[53]</sup>.

São compostos poluentes, procedentes de fontes naturais e antropogénicas, particularmente da combustão incompleta ou pirólise de substâncias orgânicas <sup>[54]</sup>.

Relativamente às fontes antropogénicas, podem ser referidas a transformação de carvão e de petróleo bruto, a combustão de gás natural e o tráfego automóvel. Já em termos de fontes naturais, as mais frequentes são as emissões vulcânicas, a carbonização e os incêndios florestais com origem em causas naturais <sup>[52, 54]</sup>.

A natureza semi-volátil por eles apresentada faz com que sejam substâncias altamente móveis no ambiente, repartindo-se entre os três meios: ar, água e solo <sup>[52]</sup>.

A maioria dos HAP contidos no ar, com baixa pressão de vapor, é adsorvida nas partículas. Mas tanto neste último caso (adsorvido nas partículas) como quando dissolvidos em água, estes compostos podem sofrer fotodecomposição se expostos à luz ultravioleta (radiação solar). Alguns microrganismos do solo também apresentam capacidade para os degradar <sup>[53]</sup>. A produção de compostos como dionas, nitro e dinitro-HAP, e ácidos sulfónicos pode acontecer aquando da reação dos HAP com alguns poluentes, tais como o ozono, óxidos de azoto e dióxido de enxofre, respetivamente <sup>[53]</sup>.

Em termos de saúde, o contacto destas substâncias com o organismo humano promove a diminuição de glóbulos vermelhos no sangue, podendo levar, em casos crónicos, ao desenvolvimento de células cancerígenas e à malformação dos fetos <sup>[52]</sup>. A sua presença nas lamas de estações de tratamento de água residual deve-se à baixa biodegradabilidade que apresentam e ao elevado carácter lipofílico, característica importante por as lamas serem uma das matérias-primas utilizadas no processo da compostagem <sup>[52, 55]</sup>.

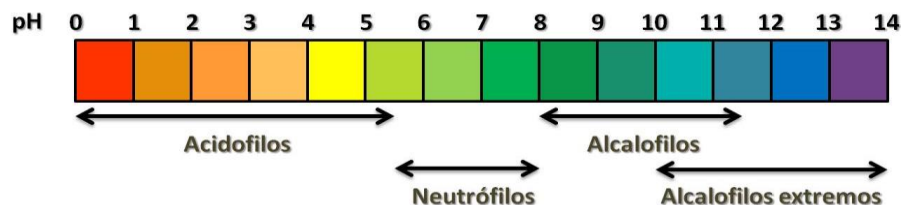
#### **d. pH**

O pH representa a medida de acidez ou alcalinidade de um meio ou material <sup>[44]</sup>.

O pH afeta drasticamente o crescimento microbiano. Cada espécie tem um intervalo de valores de pH no qual pode crescer, e um pH ótimo de crescimento. Os microrganismos com crescimento ótimo entre pH 0 e 5,5 são denominados acidófilos; os neutrófilos apresentam crescimento mais favorecido entre pH 5,5 e 8,0; e os alcalófilos preferem o intervalo de pH de 8,0 a 11,5. Já os microrganismos com crescimento ótimo a pH 10 ou superior são chamados alcalófilos extremos. De modo geral, os grupos microbianos diferentes têm preferências de pH característicos. Por exemplo, grande parte das bactérias e dos protistas são neutrófilos e, por outro lado, a maioria dos fungos prefere ambientes mais ácidos

com um pH entre 4 e 6. Já os protistas fotossintéticos parecem ficar favorecidos por uma ligeira acidez. Dentro do grupo *Archaea* muitos dos organismos são acidófilos <sup>[35]</sup>.

Na Figura 14 estão representados esquematicamente os intervalos de crescimento dos microrganismos tendo em conta o valor do pH e a sua denominação.



**Figura 14 – Esquema representativo dos intervalos de valor ótimo de pH e a denominação dos microrganismos que estão nesse grupo.**

Apesar dos microrganismos crescerem, muitas vezes em faixas amplas de pH e longe do seu pH ótimo, há sempre um valor limite para a tolerância <sup>[35]</sup>. Variações drásticas no pH citoplasmático podem prejudicar os microrganismos por perturbar a membrana plasmática ou inibir a atividade de enzimas e de proteínas com transporte pela membrana. A maioria dos procariotas não tolera pH interno abaixo de 5,0 a 5,5. A alteração no pH externo pode, também, alterar a ionização das moléculas de nutrientes e, desta forma, reduzir a sua disponibilidade para o organismo <sup>[35]</sup>. Os microrganismos têm capacidade para mudar o pH do próprio *habitat*, produzindo resíduos metabólicos ácidos ou básicos. Os microrganismos fermentativos formam ácidos orgânicos a partir de hidratos de carbono <sup>[35]</sup>.

A gama de pH em que o processo de compostagem pode acontecer é normalmente bastante abrangente (de 3 a 11), apesar da gama ideal ser de 5,5 a 8,0, sendo que as bactérias preferem pH quase neutro e os fungos se desenvolvem melhor num ambiente ácido <sup>[39]</sup>.

Ao longo do processo, o valor do pH vai sofrendo algumas oscilações apesar de, na prática, não ser facilmente alterado. Geralmente, o pH diminui no início do processo (abaixo de 5) como consequência da atividade de bactérias formadoras de ácido que metabolizam o material carbonáceo complexo de ácidos orgânicos como produtos intermédios <sup>[39]</sup>.

Esta redução dos valores do pH favorece também o crescimento de fungos que vão auxiliar no processo de decomposição da celulose e da lenhina. Posteriormente estes ácidos são decompostos até serem completamente oxidados <sup>[36]</sup>.

Nos casos em que esta fase de acidificação é longa e os metabolitos intermediários são completamente mineralizados, o pH tende a aumentar e, no final do processo pode chegar a cerca de 8,0 – 8,5 <sup>[39]</sup>.

#### **e. Taxa de respiração – Taxa de consumo de $O_2$ /formação de $CO_2$**

A quantidade de ar a ser fornecida a uma pilha de compostagem, normalmente medida em  $m^3$  de ar por quilograma de matéria seca orgânica e por hora, é geralmente obtida através de experimentação. Apesar disso, essa quantidade pode ser estimada através da absorção de oxigénio pelo metabolismo microbiano, tornando possível a obtenção de informações sobre a atividade degradativa ou, alternativamente, pode ser medido o teor de  $CO_2$  no ar de exaustão <sup>[56]</sup>.

A taxa de utilização de oxigénio representa a intensidade da atividade microbiana <sup>[57]</sup>.

Segundo Leton e Stentiford <sup>[58]</sup>, os níveis de oxigénio normalmente recomendados para o ar contido nos interstícios da massa de compostagem não devem exceder 15%, nem serem inferiores a 5%. Quando atingem valores inferiores a 5%, a velocidade de decomposição dos microrganismos aeróbios diminui até que alguns microrganismos anaeróbios passam a ser dominantes levando à criação de condições anaeróbias; enquanto que níveis de oxigénio superiores a 15% são indicativos de arejamento excessivo que tende a arrefecer o material <sup>[57, 58]</sup>.

Estes valores máximos e mínimos estimados para os níveis de oxigénio variam ligeiramente de autor para autor, sendo que rondam sempre os acima referidos <sup>[56, 59]</sup>.

A taxa de consumo de oxigénio da massa compostada também pode ser utilizada para medir a sua estabilidade e consequentemente, definir o tipo de aplicação em que o composto pode ser utilizado. Para o caso de aplicações na horticultura, são necessárias taxas inferiores a 20 mg de  $O_2$  por kg de sólidos secos compostados e por hora para que o composto possa ser classificado como suficientemente estável. Para aplicações de campo, taxas inferiores a 100 mg  $O_2$   $kg^{-1}$   $h^{-1}$  (com base na massa seca) já são consideradas satisfatórias para definição de um composto maduro <sup>[29]</sup>.

### 1.4.5 O Composto

#### 1.4.5.1 Caracterização

As utilizações do composto são normalmente restringidas pelas suas características e pelas limitações aplicáveis ao seu uso, referidas na legislação e regulamentos em vigor <sup>[60]</sup>. Por outro lado, o caso contrário também pode acontecer, sendo as características escolhidas para o processo consoante o destino final tido como objetivo para a produção do composto <sup>[61]</sup>.

Segundo Eggerth *et al.* <sup>[60]</sup> e Brito, M. <sup>[36]</sup>, os elementos mais críticos na utilização e comercialização dos compostos são a sua qualidade e consistência. A qualidade de um tipo específico de composto é função das suas características químicas, físicas e biológicas. Tendo em conta um processo de compostagem realizado apropriadamente, a qualidade do produto final é determinado pela composição e as características das matérias-primas utilizadas na produção do composto, e pelo tipo e rigor no processo utilizado para remover as impurezas.

Também o facto de, durante o processo de compostagem, o volume da pilha reduzir para cerca de metade do volume inicial, representa uma forte influência na qualidade e quantidade do produto, sendo que leva a um aumento da concentração de nutrientes e a uma redução do espaço necessário para o seu armazenamento e transporte <sup>[36]</sup>.

As características físicas normalmente avaliadas num composto são a cor, o tamanho uniforme de partículas, o odor terroso, a ausência de contaminantes, a humidade adequada e a concentração de nutrientes, fitonutrientes e quantidade de matéria orgânica representativas <sup>[36, 60]</sup>. Estas características encontram-se referidas na Tabela IV-1 do Anexo IV.

Um resumo dos parâmetros que podem ser utilizados para definir a qualidade do composto é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados para definir a qualidade do composto (Adaptado de Eggerth, L.L. *et al* <sup>[60]</sup>).

Categoria	Parâmetro	Importância
<b>Física</b>	Densidade do estruturante	Transporte, manuseamento e armazenamento
	Cor	Estética
	Humidade	Manuseamento
	Odor	Saúde, ambiente, estética e venda
	Matéria Orgânica	Qualidade do solo
	Distribuição granulométrica	Manuseamento, estética e qualidade do solo
	Capacidade de retenção de água	Qualidade do solo e Conservação da água
	Contaminantes (material inerte)	Saúde Pública e Animal, Qualidade do solo, ambiente e estética
	Maturidade	Qualidade do solo, produção de culturas e estabilidade
<b>Química</b>	pH	Qualidade do solo
	Nutrientes (macro e micro)	Qualidade do solo e produção de culturas
	Metais pesados	Qualidade do solo, saúde e ambiente
	Sais solúveis	Qualidade do solo, produção de culturas e ambiente
<b>Orgânica</b>	Compostos tóxicos	Saúde e Ambiente
<b>Biológica</b>	Patogénicos	Saúde e Ambiente
	Germinação de sementes	Qualidade do solo
	Sementes de plantas daninhas	Qualidade do solo e produção de culturas

Para classificar a qualidade do composto são utilizados alguns critérios que subdividem os produtos em “corrente”, “ecológico” e “biológico”. Os critérios para cada uma das classificações estão expostos na legislação que posteriormente se refere, exceto no caso do composto “corrente” que apenas é definido nas “Especificações técnicas sobre qualidade e utilizações do composto” documento que, apesar de ainda não ser um normativo aprovado é seguido em Portugal. Para uma caracterização mais pormenorizada são também necessárias especificações padronizadas de métodos analíticos e agronómicos que determinam a qualidade deste produto final da compostagem <sup>[36]</sup>.

#### 1.4.5.2 Aplicações

A fertilização, teoricamente, representa o enriquecimento dos solos no sentido de incrementar o desenvolvimento das plantas. Nesta área podem ser assinaladas duas tipologias: os adubos e os corretivos. Os adubos apresentam elevadas concentrações de nutrientes e, por isso, fertilizam de forma direta o solo. Já os corretivos tendem a enriquecer o solo pelo seu teor significativo em matéria orgânica, contribuindo indiretamente para o aumento da fertilidade dos solos. O composto, pelas suas propriedades químicas, é tradicionalmente classificado e utilizado como corretivo orgânico <sup>[61]</sup>.

Tal como já foi referido, o composto resultante de um processo de compostagem devidamente controlado tem um elevado potencial para melhorar substancialmente as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, melhorando a sua estrutura e agregação, textura, arejamento, teor de nutrientes e capacidade de retenção de água e aumentando a sua porosidade e fertilidade <sup>[60, 61]</sup>. Como apresenta várias características benéficas, o composto tem uma variedade de possíveis aplicações e pode ser utilizado por vários segmentos de mercado. Alguns exemplos são a agricultura, o paisagismo, a jardinagem, os viveiros, a cobertura (por exemplo de campos de golfe, parques, faixas centrais de vias de circulação), a recuperação ou reabilitação de áreas degradadas, de aterros e minas a céu aberto, e o controlo da erosão <sup>[60]</sup>.

A importância da sua aplicação como corretor de solos deve-se à sua função de fornecimento de suporte às raízes das plantas, nas quais ocorrem os principais processos de nutrição. Desta forma, torna-se um parâmetro condicionante da saúde e desenvolvimento das plantas. Já o húmus representa a fração de matéria orgânica estável, componente que confere melhores propriedades ao solo <sup>[61]</sup>. Uma vez que o composto apresenta um elevado conteúdo em substâncias húmicas, ele adiciona ao solo os benefícios inerentes à presença dessas substâncias <sup>[61]</sup>.

#### **1.4.5.3 Enquadramento Legal**

Em relação à legislação em vigor, é necessária a consulta de vários documentos.

A nível europeu foi apresentado, em 2001, o “Biological Treatment of Biowaste – 2nd draft”<sup>[13]</sup>, um documento de trabalho sobre este tema, no qual são propostas classes para a qualidade do composto e limites de concentração de metais pesados e microrganismos patogénicos <sup>[61]</sup>.

No Anexo I deste documento apresentam-se os resíduos biológicos adequados para o tratamento biológico. Já o Anexo II refere os requisitos sanitários, e as gamas de temperatura adequadas para que seja atingido um elevado nível de atividade biológica em condições favoráveis. Para além dos valores mínimos para as máximas temperaturas, é também definido o tempo durante o qual essas temperaturas devem estar presentes, consoante os sistemas de compostagem utilizados. Para cada um desses conjuntos Sistema/Temperatura/Duração, é também definido um número de revolvimentos necessários.

No decurso do processo de compostagem toda a quantidade dos resíduos biológicos deve ser misturada e exposta a uma temperatura adequada, tal como exposto na Tabela 2 <sup>[13]</sup>.

**Tabela 2 – Parâmetros de temperatura, tempo de tratamento e número de revolvimentos a cumprir (Adaptado de European Commission - Directorate-General Environment <sup>[13]</sup>).**

Sistema de compostagem	Temperatura	Tempo de Tratamento	Revolvimentos
Pilhas revolvidas	≥ 55 °C	2 Semanas	5
Pilhas revolvidas	≥ 65 °C	1 Semana	2
Em reator	≥ 60 °C	1 Semana	Nd

Nd – Não definido.

No Anexo III do “Biological Treatment of Biowaste – 2nd draft”<sup>[13]</sup>, referente às classes ambientais de qualidade do composto e de resíduos biodegradáveis estabilizados, indicam-se os limites para alguns metais pesados, contaminantes e agentes patogénicos, entre outros (Tabela 3) <sup>[13]</sup>.

**Tabela 3 – Limites para alguns metais pesados, contaminantes, agentes patogénicos entre outros (Adaptado de European Commission - Directorate-General Environment <sup>[13]</sup>).**

Biological Treatment – 2nd draft (2001)			
Parâmetro	Composto		Resíduo Biodegradável Estabilizado
	Classe 1	Classe 2	
Cádmio (Cd) – mg.kg <sup>-1</sup> (matéria seca)	0,7	1,5	5
Crómio (Cr) – mg.kg <sup>-1</sup> (matéria seca)	100	150	500
Cobre (Cu) – mg.kg <sup>-1</sup> (matéria seca)	100	150	600
Mercúrio (Hg) – mg.kg <sup>-1</sup> (matéria seca)	0,5	1	600
Níquel (Ni) – mg.kg <sup>-1</sup> (matéria seca)	50	75	5
Chumbo (Pb) – mg.kg <sup>-1</sup> (matéria seca)	100	150	150
Zinco (Zn) – mg.kg <sup>-1</sup> (matéria seca)	200	400	1500
PCB – mg.kg <sup>-1</sup> (matéria seca)	-	-	0,4
HAP – mg.kg <sup>-1</sup> (matéria seca)	-	-	3
Impurezas > 2 mm – %	<0,5	<0,5	3
Gravilha e Pedras > 5 mm – %	< 5	< 5	-

No Anexo IV desse documento define-se a frequência de amostragem e são expostos os métodos de análise e amostragem; e, no Anexo V, indicam-se os requisitos gerais para instalações de tratamento biológico. Por fim, no Anexo VI, referem-se os requisitos gerais para a utilização de biogás <sup>[13]</sup>.

Em Portugal, apresentou-se a “Proposta de norma técnica sobre qualidade e utilizações do composto” <sup>[13, 15]</sup>, tendo em conta o 2<sup>a</sup> Draft do Documento de Trabalho sobre o Tratamento Biológico de Resíduos Biodegradáveis<sup>[13]</sup>, DG-ENV. A.2, Fevereiro 2001, e o Documento de Trabalho sobre Lamas e Resíduos Biológicos, DG-ENV. A.2/LM, Dezembro 2003. Nestas Especificações Técnicas definem-se três níveis de exigência para o composto, fixando



limites diferenciados para alguns parâmetros, definindo classes para a qualidade do composto, especificações e restrições à sua utilização e visando aplicações distintas na agricultura<sup>[61]</sup>.

Tendo por base as concentrações em metais pesados, materiais inertes antropogénicos, pedras e microrganismos patogénicos no composto, estabeleceram-se nessa proposta três classes de qualidade: Classe I, II e III, admitindo-se uma quarta denominada Classe II A. Esta última apresenta um carácter provisório, até futura revisão da proposta, que deve ocorrer dentro de 3 anos (Tabela 4).

**Tabela 4 – Valores máximos admissíveis no composto para os teores “totais” de metais pesados, materiais inertes antropogénicos\*, pedras de granulometria superior a 5 mm (valores reportados à matéria seca) e valores máximos admissíveis relativos à concentração em microrganismos patogénicos (valores reportados à matéria fresca)<sup>[13, 15]</sup>.**

Parâmetro	Composto			
	Classe I	Classe II	Classe II A	Classe III
<b>Cádmio (Cd) – mg.kg<sup>-1</sup> (matéria seca)</b>	0,7	1,5	3,0	5,0
<b>Chumbo (Pb) – mg.kg<sup>-1</sup> (matéria seca)</b>	100	150	300	500
<b>Cobre (Cu) – mg.kg<sup>-1</sup> (matéria seca)</b>	100	200	400	600
<b>Crómio (Cr) – mg.kg<sup>-1</sup> (matéria seca)</b>	100	150	300	400
<b>Mercúrio (Hg) – mg.kg<sup>-1</sup> (matéria seca)</b>	0,7	1,5	3,0	5,0
<b>Níquel (Ni) – mg.kg<sup>-1</sup> (matéria seca)</b>	50	100	200	200
<b>Zinco (Zn) – mg.kg<sup>-1</sup> (matéria seca)</b>	200	500	1000	1500
<b>Materiais inertes antropogénicos* (%)</b>	0,5	1,0	2,0	3,0
<b>Pedras &gt; 5 mm (%)</b>	5,0	5,0	5,0	-
<b>Salmonella spp.</b>	Ausente em 25 g	Ausente em 25 g	Ausente em 25 g	Ausente em 25 g
<b>Escherichia coli (NMP/g)</b>	1000	1000	1000	1000

\*Incluem vidro, metais e plásticos, cujas partículas apresentem granulometria superior a 2 mm.

Para além dos parâmetros referidos na Tabela 4, são ainda colocadas restrições quanto a outros elementos, bem como a:

- Teor de humidade: inferior a 40 %;
- Granulometria: 99 % do material deverá passar por um crivo de malha quadrada de 25 mm;
- Matéria orgânica: superior a 30 %, reportada ao peso seco;
- pH: entre 5,5 e 8,5<sup>[15]</sup>.

Outra das classificações que pode ser atribuída a um composto é a de Rótulo Ecológico, permitindo que a sua aplicação seja ainda mais ampla. Tendo em conta as

necessidades especiais para atribuição deste rótulo, a Decisão da Comissão n.º 2007/64/CE que “estabelece os critérios ecológicos revistos e os respetivos requisitos de avaliação e verificação para a atribuição do rótulo ecológico comunitário aos suportes de cultura”, estipula os limites admissíveis para os teores de substâncias perigosas nele contidas.

Nos constituintes orgânicos do suporte de cultura em concurso para rótulo ecológico, o teor dos seguintes elementos, medido em relação à matéria seca, deve ser inferior aos valores indicados na Tabela 5.

**Tabela 5 – Valores máximos admissíveis para os teores totais de metais pesados no composto (adaptado de (2007/64/CE) - Comité do Rótulo Ecológico da União Europeia, <sup>[62, 63]</sup>).**

Elemento	mg.kg <sup>-1</sup> (matéria seca)	Elemento	mg.kg <sup>-1</sup> (matéria seca)
Zinco (Zn)	300	Crómio (Cr)	100
Cobre (Cu)	100	Molibdénio (Mo) (*)	2
Níquel (Ni)	50	Se(*)	1,5
Cádmio (Cd)	1	As(*)	10
Chumbo (Pb)	100	F(*)	200
Mercúrio (Hg)	1		

(\*) Apenas são necessários dados relacionados com a presença destes elementos se os produtos contiverem materiais provenientes de processos industriais.

Em relação ao comportamento do produto, este não pode apresentar efeitos negativos na germinação das plantas ou no seu posterior crescimento <sup>[62, 63]</sup>. Já para o controlo da saúde e segurança foram estipulados limites máximos para os agentes patogénicos primários, representados na Tabela 6.

**Tabela 6 – Valores máximos admissíveis de agentes patogénicos (valores reportados à matéria seca) (adaptado de (2007/64/CE) - Comité do Rótulo Ecológico da União Europeia, <sup>[62, 63]</sup>).**

Agente Patogénico	Limite
Salmonella	Ausente em 25 g
Ovos de helmintas	Ausentes em 1,5 g (5)
E. coli	<1 000 NMP*.g <sup>-1</sup> (6)

\* NMP número mais provável

Em relação ao conteúdo de sementes de infestantes, ou de partes de infestantes agressivas capazes de reprodução vegetativa, este não pode exceder as 2 unidades por litro, no produto final <sup>[62, 63]</sup>.

## **1.5 Revisão bibliográfica de Estudos Científicos recentes**

No sentido de possibilitar uma escolha correta, tanto da composição da mistura de resíduos a utilizar, como do tipo e especificações do processo e as respetivas variáveis de controlo, independentemente dos conceitos fundamentais genericamente aceites e anteriormente apresentados, realizou-se uma revisão bibliográfica, o mais atualizada possível, cujos principais estudos são resumidos na Tabela V – I do Anexo V. A sua análise apresenta-se seguidamente, dividida em dois subcapítulos, a saber: Matérias-primas a Compostar, Estruturantes e outros Adjuvantes; e, Processo de compostagem, Características e Controlo.

### **1.5.1 Matérias-Primas a Compostar, Estruturantes e outros Adjuvantes**

De acordo com os estudos realizados, verifica-se que a formulação da matéria-prima a compostar deve considerar propriedades de cada tipologia de resíduos, tais como: biodegradabilidade, tamanho das partículas (granulometria) e superfície específica.

A maior parte dos estudos sobre compostagem utiliza como principal matéria-prima resíduos orgânicos alimentares e de estações de tratamento de águas, resíduos verdes, lamas provenientes de estações de tratamento e produção animal.

Quando analisados os materiais a utilizar em mistura, no sentido de beneficiar a qualidade do composto daí resultante, podem ser consideradas várias combinações possíveis.

De acordo com a revisão realizada, revela-se ser vantajoso e necessário adicionar agentes estruturantes, de diferentes naturezas, aos resíduos a compostar, sendo que a sua utilização influencia a degradação da matéria orgânica e introduz alguns nutrientes presentes na sua constituição, como por exemplo azoto, essencial para o crescimento microbiano. A sua principal função é o controlo do arejamento do processo (através do aumento da porosidade dos resíduos), assim como a retenção de água e seu controlo. Note-se que Luo, W., *et al.* <sup>[64]</sup> mostraram ser preferível adicionar material absorvente para ajustar o teor de humidade em vez de aumentar o teor humidade diretamente nos materiais a compostar, uma vez que a última opção poderia impedir o alcance das metas de desinfeção, pois leva a uma curta fase termofílica, a uma baixa taxa de subida de temperatura e não permite atingir temperaturas de inibição, nas quais são eliminados os agentes patogénicos. Nesse mesmo estudo foi possível concluir que o aumento da razão volumétrica da mistura de agente estruturante com as lamas, juntamente com o ajuste da humidade inicial para valores apropriados (cerca de 60 %), possibilitou a melhoria da taxa de aumento da temperatura, a redução dos ciclos de compostagem, levou ao prolongamento da fase de temperatura termofílica e à eliminação dos organismos patogénicos nas diferentes camadas da pilha <sup>[64]</sup>.

De entre os materiais mais utilizados como estruturantes encontram-se: paletes de madeira trituradas e aparas de madeira <sup>[65-67]</sup>, palha <sup>[68]</sup>, serradura <sup>[69]</sup> (comparando a aplicação de palha e de serradura, a primeira permitiu melhores condições do que a serradura, uma vez que era muito mais rica em fósforo, potássio e continha carboidratos mais solúveis que a serradura, embora possa ter na sua constituição substâncias indesejadas como cobre, níquel e zinco; já a serradura pode conter pesticidas, chumbo e cádmio <sup>[69]</sup>), agulha de pinheiro <sup>[70]</sup> (apresenta uma baixa biodegradabilidade que pode até não beneficiar o processo a não ser que seja removida no final e recirculada), casca de amêndoa <sup>[71]</sup>, folhas de jardim, resíduos de casca de arroz, resíduos de papel triturado, e outros resíduos agrícolas como cascas de amendoim, palha ou feno <sup>[69]</sup>. De realçar que a utilização destes materiais leva a um aumento da razão C/N da mistura <sup>[72]</sup>. Hay, J. *et al.* <sup>[69]</sup> referem que, no caso da utilização de palha como estruturante a adicionar à massa de lama (resíduo que se pretende compostar), a disponibilidade de nutrientes e açúcares solúveis neste agente estruturante, assim como nas lamas às quais seria misturado, influencia o crescimento da população microbiana em toda a massa a ser compostada. O conteúdo de nutrientes também afeta as qualidades fertilizantes do produto final, sendo que estes resultados sugerem que a mistura de palha é a melhor fonte de certos nutrientes necessários para sustentar o processo de compostagem mas que, por outro lado, a maioria dos macronutrientes (com exceção de potássio) e todos os micronutrientes necessários para apoiar a atividade de compostagem são abundantes nas lamas, tendo a constituição destas uma maior influência nas concentrações da massa de compostagem. Também, no estudo realizado por Tognetti, C. *et al.* <sup>[66]</sup>, estes concluíram que a adição de aparas de madeira aumentou a concentração de matéria orgânica, mas reduziu a qualidade em termos de quantidade de nutrientes disponíveis.

Segundo Guardia, A. *et al.* <sup>[73]</sup>, dentre as diferentes tipologias de resíduos de jardim, os ramos de árvores e arbustos apresentaram baixa taxa de biodegradação, embora a sua estrutura favoreça o arejamento da pilha; já as folhas, ervas daninhas e relva cortada, apresentaram-se como sólidos finos, mais húmidos e ricos em azoto, permitindo uma taxa de biodegradação mais elevada do que, por exemplo, no caso dos ramos.

Em termos de manipulação do material, a trituração da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos só foi eficaz para aumentar a qualidade do produto quando não se adicionou nenhum outro tipo de resíduos ou agente estruturante <sup>[66]</sup>.

A dosagem destes agentes estruturantes deve ser ponderada uma vez que a sua utilização em excesso pode tornar-se nociva, aumentando demasiado o teor de humidade e levando a uma maior consolidação do material a compostar, afetando negativamente o

arejamento e, conseqüentemente, a disponibilidade de oxigénio para a flora microbiana <sup>[65]</sup>, diminuindo a eficiência do processo <sup>[64]</sup>.

Outros tipos de materiais são por vezes utilizados como adjuvantes em conjunto com os resíduos a compostar para melhorar algumas das suas características. A título de exemplo, a adição de lamas a outros produtos a compostar, como os resíduos orgânicos municipais, pode possibilitar a obtenção de composto de qualidade superior, apresentando maior concentração total de nutrientes e matéria orgânica, maior potencial de mineralização dos nutrientes e de crescimento das plantas <sup>[66]</sup>.

Após a investigação realizada por Himanen, M. & Hänninen, K. <sup>[74]</sup>, em termos de mineralização, a compostagem de lamas provenientes de tratamento aeróbio e anaeróbio não foi idêntica. A maior mineralização e libertação de dióxido de carbono foi registada durante a compostagem de lamas de tratamento anaeróbio, enquanto que a amonificação e nitrificação foram maiores na compostagem de lamas de tratamento aeróbio. Neste mesmo estudo foi possível verificar que a fitotoxicidade foi eliminada mais cedo na compostagem de lamas do que na compostagem de resíduos orgânicos de cozinha <sup>[74]</sup>.

No estudo realizado por Bernai, Paredes *et al.* <sup>[75]</sup>, a adição de algodão a uma lama que se pretendia compostar permitiu estabilizar o composto em 49 dias, período inferior ao necessário para todas as restantes misturas testadas.

Por outro lado, alguns materiais que parecem ter as características apropriadas para melhorar o processo de compostagem (nomeadamente pelas suas características absorventes), podem não o fazer. Um bom exemplo deste facto é o papel triturado, que apesar de ter boas características como absorvente, de acordo com Farrell, M. and D.L. Jones <sup>[76]</sup>, não traz benefícios ao processo, uma vez que os resultados obtidos aquando da sua utilização não foram diferentes dos que obteriam se não fosse aplicado. A utilização de guardanapos e rolo de cozinha também foi testada por Felícia <sup>[77]</sup>, tendo concluído que os guardanapos favoreceram o processo e o rolo de cozinha, apesar de apresentar resultados semelhantes, origina valores sempre menos satisfatórios.

A junção de cinzas volantes de carvão ao composto permitiu um aumento do seu pH, sendo que, após a análise do trabalho de Fang, Wong *et al.* <sup>[78]</sup>, se pôde constatar que esta adição não deve ser superior a 25 %, no sentido de produzir um material com as propriedades adequadas no que diz respeito aos efeitos fitotóxicos e ecotoxicidade. Neste estudo, verificou-se que a adição de cinzas volantes e de cal às lamas provenientes de uma estação de tratamento de águas residuais aumentou o conteúdo total de sólidos e diminuiu a fração orgânica de sólidos totais <sup>[79]</sup>.

No seguimento do estudo realizado por Grigatti, Ciavatta *et al.* <sup>[80]</sup>, a compostagem de resíduos de jardim (cortados e podados) com lamas de origem urbana ou agroindustrial, nas percentagens de, respetivamente, 70 % (V/V) e 30 % (V/V) dos primeiros com 60% (V/V) e 40 % (V/V) das segundas, levou a um elevado grau de estabilização do composto resultante.

### 1.5.2 Processo de compostagem, características e controlo

Os processos utilizados para a compostagem podem ser bastante variados e condicionam naturalmente o resultado obtido. Tendo como objetivo o aumento da eficiência global pode ser usado um só processo ou a combinação de mais do que um.

Quando testada a conjugação de um sistema fechado, em reator com mistura constante (compostagem acelerada) com o processo em sistema aberto, por pilhas revolvidas, foi possível observar que a utilização do reator acelera o processo, permitindo diminuir o tempo necessário para maturação subsequente (em pilha), diminuindo assim o tempo total necessário. Por outro lado, esta escolha não pode ter em conta unicamente o tempo, uma vez que a residência no reator aumenta os custos do processo <sup>[81]</sup>. O uso de um sistema fechado em reator acelerado automatizado, com controlo de agitação e arejamento, conforme refere Rihani, M. *et al.* <sup>[82]</sup> permitiu a obtenção de bons produtos finais para vários tipos de misturas, incluindo lamas urbanas primárias conjugadas com folhas de beterraba (primeira mistura) e com estrume de ovelha, folhas de beterraba e palha (segunda mistura). Independentemente do processo ser realizado em sistema aberto ou fechado, é importante definir a natureza do sistema de arejamento a utilizar, se estática, passiva ou dinâmica, assim como a frequência do revolvimento do composto (quando realizado) <sup>[65]</sup>.

A utilização de pilhas de 1,5 m<sup>3</sup> (1,5 de comprimento x 1 largura x 1 altura), experimentada por Vargas-García, *et al.* <sup>[71]</sup>, permitiu chegar a resultados muito satisfatórios, nomeadamente razões C/N finais em torno de 12.

No que diz respeito aos sistemas de pilhas revolvidas, a frequência do revolvimento do material é também um aspeto a ter em conta, pois quando é realizado em excesso pode comprometer o resultado do processo uma vez que diminui a atividade biológica, levando à acumulação de compostos inibitórios de crescimento de plantas, tais como ácidos gordos de baixo peso molecular <sup>[83]</sup>. Em contrapartida, uma frequência de revolvimento deficiente pode promover locais de anaerobiose e a compactação do material. Desta forma, tanto o revolvimento efetuado de 2 em 2 dias realizado no estudo de Caricasole, P., *et al.* <sup>[70]</sup>, como o revolvimento feito duas vezes por semana levado a cabo por Tiquia *et al.* <sup>[84]</sup>, levou a resultados bastante positivos, pelo menos quando realizados em pequena escala. Também a forma de revolvimento pode variar entre manual ou auxiliada por um equipamento, sendo que, nos

estudos encontrados, a primeira conduziu a bons resultados <sup>[20, 70, 84]</sup>, ao contrário da auxiliada por uma retroescavadora, tal como experimentado por Santos <sup>[20]</sup> no processo II do seu estudo. Adicionalmente, o arejamento por revolvimento, em detrimento do arejamento estático forçado, revelou-se bastante favorável levando a maior grau de maturação do composto <sup>[85]</sup>.

Relativamente a outras características do processo de compostagem, há vários métodos que concorrem para melhorar a sua eficiência, como por exemplo a aplicação de uma cobertura sobre as pilhas (no caso de um sistema aberto), podendo ela ser de composto já maduro <sup>[64, 83]</sup> ou de material plástico impermeável ou permeável <sup>[86]</sup>; o primeiro não permite atingir temperaturas tão elevadas, mas possibilita uma existência regular de oxigénio, e o segundo permite atingir temperaturas mais elevadas, mas diminui o acesso de oxigénio. Esta cobertura pode ser mantida durante todo o processo, especialmente no caso do plástico que só tem de ser retirado aquando dos revolvimentos efetuados, ou até ao primeiro revolvimento (no caso de pilhas revolvidas ou estáticas com revolvimento periódico), podendo ser ou não repostos o material de cobertura.

A utilização de uma cobertura permite um melhor isolamento das pilhas, a minimização da perda de água e funciona como um biofiltro para minimizar as emissões de odor para a atmosfera <sup>[83]</sup>.

Comparando a eficiência relativamente à utilização das várias formas de cobertura, as referidas permitiram atingir temperaturas termofílicas, sendo que a diferença mais relevante se verifica na permeabilidade da cobertura plástica (quando a cobertura é impermeável permite alcançar temperaturas mais elevadas). Deste modo, a comparação deve ser feita tendo em conta o preço da cobertura plástica, que é sempre mais elevada do que a utilização de composto, e as características que podem fazer com que este gasto seja justificável (clima, variações de temperatura exterior, etc.).

Relativamente às variáveis de controlo do processo, os estudos avaliados mostraram que o controlo da humidade é um aspeto crucial, pois influencia as temperaturas atingidas ao longo do processo. Valores de cerca de 60 % (m/m) revelaram-se benéficos para a qualidade e rapidez da compostagem <sup>[70]</sup>. Quando este valor é ultrapassado em demasia, a eficácia do processo de compostagem diminui, tal como mostra o estudo de *Tiquia, Tam et al.* <sup>[84]</sup>, no qual a eficiência é bastante reduzida quando a humidade é mantida a 70 % (m/m) e aumenta quando o teor de humidade se mantém nos 50 e 60 % (m/m).

O tamanho das partículas influencia a sua superfície específica, sendo mais lenta a degradação dos resíduos quanto maior o seu tamanho. Já partículas mais pequenas têm uma superfície específica mais elevada, mas quando são demasiado pequenas levam à consolidação do composto, impedindo a circulação de ar. Assim, os estudos utilizaram métodos como a

trituração e a peneiração para permitir maior rapidez na compostagem <sup>[75]</sup>. A tecnologia de filtração por membrana foi utilizada por Guardia, A. *et al.* <sup>[73]</sup> com o objetivo de simular a influência do biofilme formado em redor dos materiais na compostagem de resíduos orgânicos, que vai variar com a superfície específica desses materiais.

Doubllet *et al.* <sup>[67]</sup> realizou a seleção de uma granulometria de partículas (20 mm) para prosseguir para a fase de maturação, após três meses do início do processo; no entanto, tal mostrou ser prejudicial uma vez que se verificou a volatilização e consequente perda de azoto no processo de seleção das partículas, sucedendo-se uma diminuição da velocidade de degradação do carbono orgânico e uma inibição da estabilização do azoto orgânico <sup>[67]</sup>. O controlo e seleção da granulometria do agente estruturante antes da sua integração nos resíduos, teve, no entanto, resultados positivos no processo <sup>[7, 87]</sup>.

O pH do composto é um parâmetro muito importante, uma vez que, tal como verificado no trabalho realizado por Felícia, D.G. <sup>[77]</sup>, quando aplicado no solo a sua acidez ou alcalinidade excessiva pode danificar a raiz das plantas e inibir o seu crescimento ou desenvolvimento. A utilização de resíduos com pH muito reduzido, como por exemplo o bagaço de uva, pode tornar necessária a correção do pH utilizando um corretor calcário <sup>[20]</sup> ou a adição de um outro resíduo com pH mais elevado (sendo realizada uma co- compostagem), para que seja possível no final do processo obter um material com pH adequado. No estudo realizado por Fang and Wong <sup>[88]</sup>, a adição de cal a uma mistura de lamas de ETAR e serradura de madeira levou ao prolongamento da fase termofílica, à redução significativa da solubilidade em água de cobre (Cu), manganês (Mn) e zinco (Zn) e à diminuição do índice de germinação, sendo que, quanto mais elevada a quantidade adicionada, menor é este índice. Assim, o doseamento deste tipo de agentes deve ser controlado para não prejudicar o processo; de acordo com estes autores, foi recomendada a utilização de uma percentagem de cal inferior a 1,0 %.

Baeta-Hall, L. *et al.* <sup>[69]</sup> refere que o parâmetro temperatura é o mais útil para controlo da evolução do processo de compostagem, dada a sua fácil medição tanto pontual como de forma contínua. A temperatura da pilha é o reflexo da sua atividade microbiana e permite detetar alterações ocorridas durante o processo. Estes autores também demonstram que a utilização de misturas com menor quantidade de material estruturante dificulta o alcance de temperaturas tão elevadas através dum estudo em que são utilizadas duas misturas distintas: 29 % de lama com 71 % de palha e 45 % de Lama com 55 % de serradura. Nesta experiência, a mistura com maior quantidade de material estruturante (primeira) atingiu temperaturas mais elevadas e mais rapidamente do que a segunda mistura <sup>[69]</sup>.



O facto de, ao longo do processo, não serem atingidas temperaturas inibitórias do crescimento microbiano pode levar à permanência de agentes patogénicos no composto final [83]. Tal como já foi referido, a utilização de coberturas, tanto de plástico como de composto podem permitir atingir temperaturas mais elevadas e mantê-las durante mais tempo [64, 83, 86].

Um dos motivos que tornam o revolvimento importante é a homogeneização das temperaturas a que todo o material é sujeito. Deste modo, como as zonas periféricas da pilha/reator nunca atingem valores tão altos como o centro, o revolvimento permite que o material que estava na periferia passe para o centro, podendo ser exposto às mesmas condições [68].

Existem estudos que avaliam também as melhores condições considerando a variação de mais do que um parâmetro. Por exemplo, num estudo de Kumar, M. *et al.* [87], quando testadas várias combinações iniciais de teor de humidade e razão C:N numa mistura de resíduos alimentares e resíduos verdes, usando como agente estruturante a casca de arroz, a que se revelou mais vantajosa para o processo foi a de 60 % (m/m) de humidade e 19,6 de razão C:N, tendo em consideração os testes de germinação realizados ao composto resultante.

A existência de contaminantes no composto final é extremamente importante, nomeadamente a presença de metais pesados, pois existem limites legais para a concentração destes no composto por forma a permitir a sua aplicação no solo [20].

Para avaliação do desenvolvimento do processo, verifica-se que a diminuição da massa do material em compostagem [68], bem como o índice de germinação (que deve ser sempre superior a 50 – 60 %) [89, 90] são frequentemente utilizados. O índice de germinação é medido adicionando uma determinada quantidade de composto ao solo, observando-se o crescimento de uma planta semeada [77]. No estudo efetuado por Zhang, J. *et al.* [68], verificou-se uma diminuição de massa de cerca de 25,4 % após o processo de compostagem.

Assim, é possível perceber que é muito importante não só ter em conta a mistura dos materiais, mas também a sua granulometria, as condições de arejamento, a necessidade de cobertura entre outros. A monitorização do processo deve ser realizada cuidadosamente para que, mal ocorra algum tipo de alteração não esperada, se possa compreender o motivo e corrigir a situação. O alcance de temperaturas de cerca de 60 °C deve ser garantido, para que os agentes patogénicos sejam removidos até o composto final ser conseguido.

## 1.6 Descrição da Empresa Gintegral, S.A.

A presente dissertação foi realizada em ambiente empresarial, na empresa Gintegral – Gestão Ambiental, S.A. Trata-se de uma empresa criada no ano 2000, que opera na área de gestão de resíduos e que dispõe de unidades na Zona Norte e Centro do País. A empresa

encontra-se licenciada como Operador de Gestão de Resíduos para operações de reciclagem (R03), receção, recolha, armazenamento, triagem e encaminhamento para operações de valorização (R13) e para deposição final, no caso dos resíduos não passíveis de valorização (D15), num total de 137 códigos inscritos na Lista Europeia de Resíduos (LER, Portaria 209/2004).

Atualmente tem 1 unidade de reciclagem de plásticos e armazenamento temporário de resíduos diversos na Zona Norte, 1 unidade de armazenamento temporário de resíduos diversos na Zona Centro e 2 Unidades de Valorização e Armazenamento de resíduos orgânicos. Está também prevista a construção e arranque de outra unidade de gestão de resíduos, que se encontra, atualmente, em processo de licenciamento.

Com o início do processo a desenvolver na Unidade de Compostagem, que se encontrava em fase de licenciamento a quando do início do presente trabalho, tornou-se importante realizar um estudo de forma a verificar que misturas de resíduos orgânicos são mais vantajosas para o escoamento dos resíduos desta tipologia recebidos pela Empresa Gintegral, no sentido de os transformar num composto da melhor qualidade possível. A presente dissertação relata a realização desses estudos.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

#### 2.1.1 Matérias-Primas

As principais matérias-primas utilizadas no trabalho experimental são as enumeradas em seguida.

##### 2.1.1.1 Lama de Estação de Tratamento de Águas Residuais Urbanas

Neste trabalho experimental foi utilizada uma lama proveniente de uma ETAR urbana, especificamente a ETAR de Fátima. Esta infraestrutura está incluída no subsistema de Fátima e serve, não só a Freguesia de Fátima, mas também parte da freguesia de Nossa Senhora das Misericórdias. A operacionalização deste subsistema assegura o tratamento dum efluente com caudal médio tratado de  $5\,193\text{ m}^3\cdot\text{dia}^{-1}$  (o diagrama do processo de tratamento encontra-se representado no Anexo VI) <sup>[91]</sup>. A Tabela 7 apresenta o resumo dos valores relativos aos parâmetros analisados na lama utilizada. Tal como se pode observar, a lama apresenta um pH básico, uma quantidade considerável de matéria orgânica e um teor de humidade bastante elevado. Em relação aos metais pesados, são o cobre e o zinco que mais se evidenciam.

**Tabela 7 – Resumo dos valores característicos dos parâmetros analisados na Lama de ETAR utilizada.**

Parâmetro	Valor	Unidades
Matéria Orgânica	62	% m.m <sup>-1</sup> matéria seca
pH	9	Escala de Sorensen
Cobre	142	mg Cu.kg <sup>-1</sup> de matéria seca
Cádmio	<0,20	mg Cd.kg <sup>-1</sup> de matéria seca
Níquel	<100	mg Ni.kg <sup>-1</sup> de matéria seca
Chumbo	<80	mg Pb.kg <sup>-1</sup> de matéria seca
Zinco	340	mg Zn.kg <sup>-1</sup> de matéria seca
Crómio	<100	mg Cr.kg <sup>-1</sup> de matéria seca
Mercúrio	<10	mg Hg.kg <sup>-1</sup> de matéria seca
Salmonella spp	Negativa	/50 g
<i>Escherichia coli</i> (E. coli)	<10	ufc.g <sup>-1</sup>
PCB	<0,13	mg.kg <sup>-1</sup> de matéria seca
Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (HAP)	<0,39	mg.kg <sup>-1</sup> de matéria seca
Humidade	78	%

#### **2.1.1.2 Resíduos de Rações**

Foram também utilizados como matéria-prima resíduos de ração animal, entre os quais os pós de ração e as rações fora de prazo ou sem condições mínimas para venda, cedidas pela empresa *Avenal rações*. A caracterização deste resíduo não é conhecida.

#### **2.1.1.3 Resíduos de Silagem**

A silagem representa um método biológico de preservação do milho, que visa a conservação do seu valor nutritivo e dos seus níveis de humidade. A conversão dos hidratos de carbono em ácidos orgânicos, bem como em ácido láctico e acético, é um dos processos presentes neste método <sup>[3]</sup>.

Este resíduo foi cedido pela empresa *Pioneer Sementes*. Uma vez que não foi possível obter a caracterização do material utilizado, foram utilizados valores da bibliografia consultada. Assim, a caracterização geral deste resíduo refere teor de matéria seca de 30 a 35 % e amido em quantidade superior a 28 %, valores reportados a matéria seca <sup>[92]</sup>.

#### **2.1.1.4 Estruturante**

Utilizou-se como estruturante uma mistura de casca de pinheiro e eucalipto, ramos e folhas secas. Este material foi adquirido pela Gintegral, S.A. à empresa Capitão & Lima, Lda., a partir do qual foi obtido o teor de humidade da mistura (30 %). O calibre escolhido será referido mais à frente neste documento. Também se lhe adicionou uma pequena quantidade de outros resíduos verdes, isto é, as ervas daninhas provenientes da limpeza dos jardins nas imediações da Central de Valorização Orgânica da Gintegral.

#### **2.1.1.5 Cinzas de biomassa**

Tal como acontece com muitos materiais compostáveis, a fonte das cinzas deve ser considerada antes de ser adicionada à pilha de compostagem <sup>[93]</sup>.

A composição elementar da cinzas de biomassa varia de acordo com as suas componentes vegetais que sofreram combustão, o uso de aditivos, a aplicação de pré-tratamentos, a tecnologia e a temperatura de combustão, bem como com o tempo e as condições de armazenamento <sup>[94]</sup>.

Na Tabela 8 encontra-se o resumo das principais características das cinzas utilizadas. Têm pH bastante elevado e baixo teor em matéria orgânica e humidade.

Tabela 8 – Parâmetros característicos das cinzas de caldeira de biomassa utilizadas.

Parâmetros	Quantidade	Unidades
Matéria Orgânica	3,1	% m.m <sup>-1</sup> matéria seca
pH	11,9	Escala de Sorensen
Cobre	<LQ	mg Cu.kg <sup>-1</sup> de matéria seca
Cádmio	<LQ	mg Cd.kg <sup>-1</sup> de matéria seca
Níquel	<LQ	mg Ni.kg <sup>-1</sup> de matéria seca
Chumbo	35	mg Pb.kg <sup>-1</sup> de matéria seca
Zinco	<LQ	mg Zn.kg <sup>-1</sup> de matéria seca
Crómio	<LQ	mg Cr.kg <sup>-1</sup> de matéria seca
Mercúrio	<LQ	mg Hg.kg <sup>-1</sup> de matéria seca
Salmonella spp	Ausente	/50 g
<i>Escherichia Coli</i> (E. coli)	<10	ufc.g <sup>-1</sup>
PCB	<LQ	mg.kg <sup>-1</sup> de matéria seca
Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (PAH)	<LQ	mg.kg <sup>-1</sup> de matéria seca
Humidade	12,3	%

LQ – Limite de Qualificação (não conhecido)

A caracterização química deste material foi também realizada no âmbito do presente trabalho, sendo apresentada no Capítulo 3 – Resultados e Discussão.

## 2.1.2 Reagentes e Materiais

### 2.1.2.1 Construção de pilhas e amostragem

Para realização dos ensaios piloto, em pilhas de compostagem, recorreu-se a uma pá e uma enxada, utilizando sempre luvas (Figura 15), tentando reproduzir a forma representada na Figura 16.



Figura 15 – Construção das pilhas.

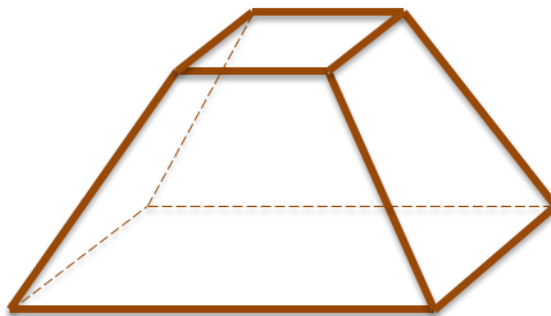


Figura 16 – Forma pretendida para as pilhas construídas.

Para a amostragem foram utilizados os seguintes materiais:

- Pá para escavação;
- Recipiente para recolha de amostras;
- Etiquetas;
- Luvas.

### 2.1.2.2 Análise Granulométrica

Para a análise da granulometria da amostra foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- Peneiros (malhas: 31,5 mm; 25 mm; 14 mm; 5 mm; 2 mm) (Figura 17);
- Peneiradora vibratória (Figura 17);
- Balança semi-analítica (*AND Electronic Balance*, erro  $\pm 0,1$  g) (Figura 17);
- *Gobelet*.

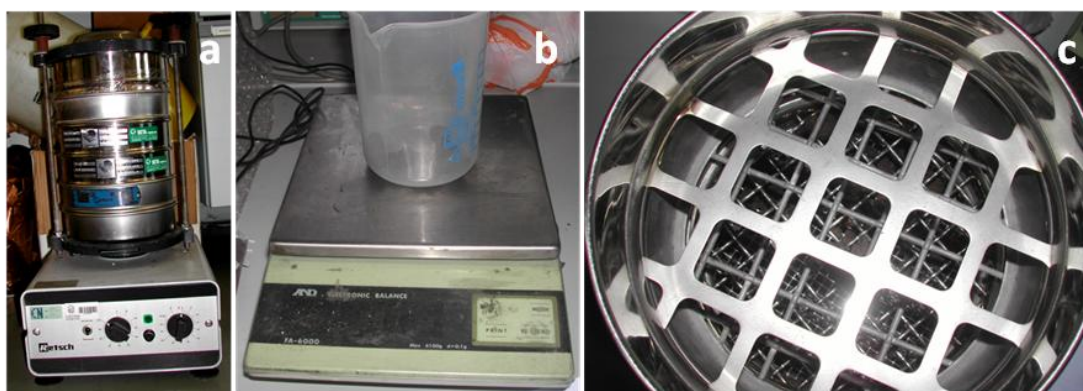


Figura 17 – Peneiradora vibratória (a); Balança e *gobelet* para pesagem do composto (b); Conjunto de peneiros montados, vistos de cima (c).

### 2.1.2.3 Determinação da humidade

Para a determinação da humidade usaram-se os seguintes materiais e equipamentos:

- Balança semi-analítica (*AND Electronic Balance*, erro  $\pm 0,1$  g);
- Espátula;
- Placas de Petri;
- Vidros de Relógio (Figura 18 – B);
- Estufa modelo “Digitheat” da Marca: J.P. Selecta (Figura 18 – A);
- Taças metálicas (Figura 18 – B).

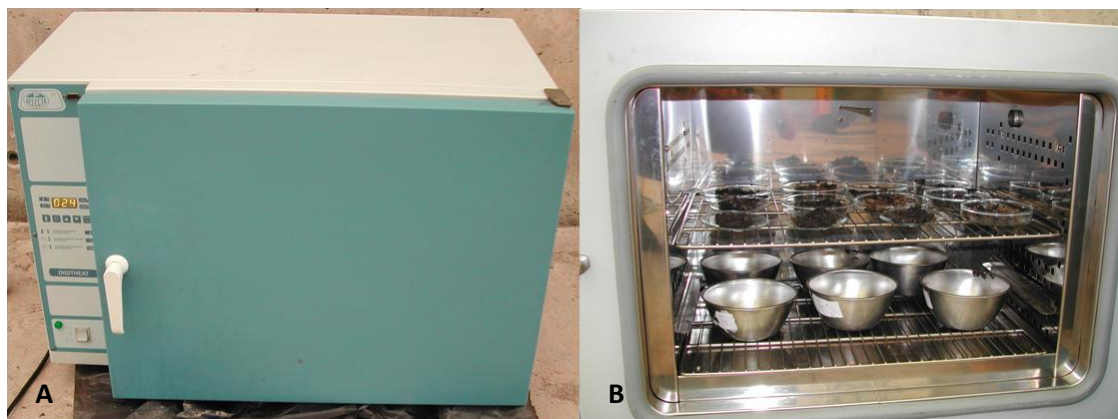


Figura 18 – Estufa utilizada para a medição da humidade. Estufa fechada (A); Estufa aberta com as placas de Petri, vidros de relógio e taças no seu interior (B).

#### 2.1.2.4 Determinação do mercúrio

Para a determinação do mercúrio utilizaram-se os seguintes materiais, equipamentos e reagentes:

- Espectrofotómetro – UNICAM VP 90 – Vapour System (Figura 19);
- *Gobelet*;
- Espátulas;
- Vidros de relógio;
- Pipetas de 5, 10, 20 e 25 mL;
- Pompete;
- Balão de vidro Kjeldahl;
- Balões volumétricos;
- Ácido sulfúrico –  $d_{20}$  1,84;
- Ácido nítrico –  $d_{20}$  1,42
- Permanganato de Potássio
- Cloreto de hidroxilamónio ( $\text{HONH}_2 \cdot \text{HCl}$ )
- Cloreto de mercúrio
- Ácido clorídrico
- Cloreto de estanho

Foram também utilizadas as seguintes soluções (o modo de preparação das soluções encontra-se descrito no Anexo VII):

- a. Solução 50% V/V de ácido nítrico e ácido sulfúrico;
- b. Solução 6% m/V permanganato de potássio
- c. Solução de 20 % de  $\text{HONH}_2 \cdot \text{HCl}$ :
- d. Solução “mãe” de mercúrio (solução já se encontrava preparada)



- e. Solução padrão de mercúrio (solução já se encontrava preparada)
- f. Soluções padrão de 5, 10, 20 e 30  $\mu\text{g.L}^{-1}$
- g. Solução de ácido clorídrico 10% (V/V)
- h. Solução de cloreto de estanho

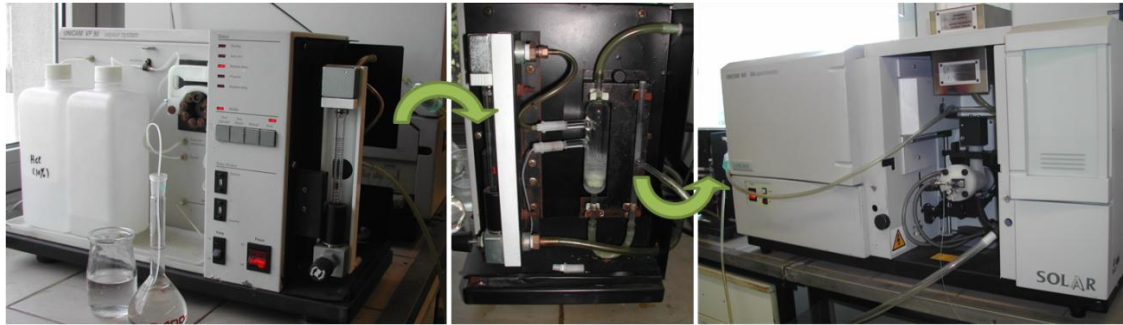


Figura 19 – Espectrofotómetro de absorção atómica e os seus constituintes.

#### 2.1.2.5 Análise microbiológica – *Escherichia Coli*

Na análise à *Escherichia Coli*, foram utilizados os seguintes materiais, reagentes e equipamentos:

- Frasco Schott (1 L)
- Frascos de 100 mL
- Meio Lauryl Sulphate Broth – referência 1.10133.0500 da marca MERCK;
- Meio Fluorocult - referência 1.04037 da marca MERCK;
- Kovacs – referência 1.09293.0100 da marca MERCK;
- Agar – Referência 611001, marca Liofilchem;
- Água destilada
- Autoclave – marca AJC – UNICLAVE 88
- Balança de marca KERN EW com máximo de 1500 g e erro associado à medição de 0,1 g;
- Agitador magnético + barra magnética;
- Bico de Bunsen
- Agitador Vortex marca VWR – VV3
- Caixas de Petri;
- Filtro
- Bomba
- Sistema de Filtragem Marca GelmanSciences;
- *Gobelet*;
- Tubos Durham;
- Agitador ARALAB modelo AGITORB 200.

### 2.1.2.6 Análise da matéria orgânica

Para a análise da matéria orgânica, utilizaram-se os seguintes materiais e equipamentos:

- Balança analítica da marca AND, modelo GF300 com um erro associado de 0,001 g;
- Cadinhos de porcelana;
- Espátula;
- Mufla da marca Carbolite;
- Exsicador.

### 2.1.2.7 Análise da constituição química

Para a análise da constituição química das amostras utilizou-se o seguinte material e equipamentos:

- Peneiro 150  $\mu\text{m}$ ;
- Triturador;
- Cápsulas;
- Analisador de fluorescência de Raios X (XRF) – da marca Thermo Scientific modelo Niton XL3 – XRF (Figura 20 - B);
- Hélio (Figura 20 – C);
- Computador para aquisição de dados (Figura 20 – A).



Figura 20 – Computador (A), analisador de fluorescência de raios X (B) e botija de hélio (C).

### 2.1.2.8 Análise da fitotoxicidade

Para a análise de fitotoxicidade foram utilizados os seguintes materiais:

- Pá;
- Vasos (Figura 21);
- Terra;
- Turfa;
- Medida de 100 mL (Figura 21);
- Copos para mistura (Figura 21);



Figura 21 – Medida de 100 mL (A), copos para mistura (B) e vaso (C);

## 2.2 Métodos

### 2.2.1 Compostagem – “Setup”

#### 2.2.1.1 Manipulação prévia das lamas

Uma vez que a deposição das lamas no local de construção das pilhas foi realizada no dia anterior à sua construção, foram adicionados 18 % de resíduos castanhos (percentagem mínima deste material utilizada nas misturas de materiais), e realizado um primeiro revolvimento para homogeneização da mistura. A adoção deste procedimento foi tomada no sentido de prevenir a formação de zonas de anaerobiose na lama durante o período de espera até à construção das pilhas.

### **2.2.1.2 Construção das pilhas**

#### **a. Mistura e Proporção de Materiais**

Neste caso, tal como já foi referido anteriormente, foram usados como agentes estruturantes resíduos castanhos constituídos por casca de pinheiro, casca e folhas de eucalipto, estilha de madeira, resíduos verdes como as ervas daninhas provenientes da limpeza dos jardins nas imediações da Central de Valorização Orgânica onde o estudo decorreu e resíduos de silagem, que para além desta função operam como inoculantes, uma vez que já contêm alguma fauna microbiana desenvolvida. A utilização de pouca quantidade de resíduos verdes deve-se ao facto de toda a mistura já ser bastante húmida e com bastante material azotado, dada a elevada proporção de lama.

Para a formulação das misturas foi também tido em conta o teor de humidade dos materiais, tentando que a sua escolha levasse a um valor na mistura final dentro do considerado ideal para o desenvolvimento do processo de compostagem, isto é, 50 – 60 %<sup>[19]</sup>.

Por outro lado, também foram consideradas outras propriedades dos materiais em questão, por exemplo o pH da cinza. Para isso, apesar deste material apresentar uma humidade baixa que levaria à diminuição da humidade global da pilha, tal como era desejado, não foi adicionado mais de 5 % para não levar a um aumento não desejado do pH da mistura.

Começou por se definir uma mistura com maior quantidade de lama, uma vez que este é o resíduo recebido em maior quantidade na Central de Compostagem, em torno do qual ronda o maior interesse do processo de compostagem para a empresa; porém, garantindo sempre que a humidade da mistura não ultrapassava muito 60 % (valor considerado ideal). Assim, a mistura definida foi de 70 % de lama com 30 % de outros resíduos, nos quais se incluíram a silagem, a mistura de resíduos castanhos, a ração e a cinza (nas percentagens referidas na Tabela 10), conseguindo uma humidade estimada de 64,6 %.

Para a segunda mistura considerou-se usar 50 % de lama e 50 % de restantes resíduos, mantendo as proporções destes dentro dos 50 %, isto é, na mistura 1 utilizou-se 60 % de estilha no total de 30 % destinados aos “outros resíduos”, perfazendo, assim, 18 % de estilha na mistura total. Na mistura 2 usou-se novamente 60 % de estilha, mas em 50 % de “outros resíduos”, portanto 30 % de estilha na mistura total. O mesmo se verificou com os outros constituintes.

Na mistura três, por outro lado, foi mantida a proporção entre as parcelas lama e restantes resíduos, mas a proporção dos resíduos nessa parcela mudou, passando a ser 95 % de estilha e 5 % de cinza, ou seja, 47,5 e 2,5 % de estilha e cinza, respetivamente, na mistura final.

A escolha da mistura sem resíduos de ração, nem silagem, deveu-se também ao facto destes serem rececionados com menor frequência, tornando-se fundamental a determinação do resultado final do processo sem a sua presença.

Na Tabela 9 apresenta-se um resumo das proporções utilizadas nas misturas.

**Tabela 9 – Percentagem de resíduos utilizados nas três misturas experimentadas.**

Parcela	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3
<b>Lama</b>	70 %	50 %	50 %
<b>Restantes Resíduos</b>	30 %	50 %	50 %

Já na Tabela 10 estão indicadas as proporções de cada resíduo no seu grupo e na mistura final.

**Tabela 10 – Proporções de resíduos utilizados nas misturas 1, 2 e 3 ( $M_1$ ,  $M_2$  e  $M_3$ , respetivamente), quantidade dos resíduos no grupo onde se inserem – Q/P – (Lama ou Restantes Resíduos) e dados de cada resíduo (Densidade e Humidade).**

Parcela	Material	Densidade (kg.m <sup>-3</sup> )	Humidade (%)	Q/P	$M_1$ (%)	Q/P	$M_2$ (%)	Q/P	$M_3$ (%)
<b>Lama</b>	Lama	1000	78*	1	70	1	50	1	50
<b>Restante Resíduos</b>	Estilha	500	30**	0,6	18	0,6	30	0,95	47,5
	Cinza	840	12***	0,1	3	0,1	5	0,05	2,5
	Ração	650	10	0,1	3	0,1	5	0	0
	Silagem	234	65 <sup>[92]</sup>	0,2	6	0,2	10	0	0

\*Boletim analítico cedido pela ETAR.

\*\* Valor cedido pelo produtor de estilha.

\*\*\* Boletim analítico das cinzas.

É importante diferenciar a percentagem de cada resíduo na mistura total da percentagem do resíduo na parcela em que foi inserido uma vez que, da mistura 1 ( $M_1$ ) para a mistura 2 ( $M_2$ ) o que mudou foi a relação lama/restantes resíduos, que passou de 70 %/30 % para 50 %/50 %, mantendo a mesma proporção de resíduos em cada uma destas parcelas. Já da mistura 2 ( $M_2$ ) para a mistura 3 ( $M_3$ ) o que varia é a relação entre os resíduos dentro de cada parcela, mantendo-se a relação lama/ restantes resíduos igual a 50 %/50 %.

Na Tabela 11 encontram-se os valores estimados de humidade de cada mistura, bem como a sua densidade, obtidos através da média da humidade e densidade dos resíduos constituintes de cada mistura.

**Tabela 11 - Humidade e densidade das misturas realizadas.**

	Humidade (%)	Densidade mistura (kg.m <sup>-3</sup> )
<b>Mistura 1</b>	64,6	848,7
<b>Mistura 2</b>	55,6	747,9
<b>Mistura 3</b>	53,6	758,5

Tendo em conta o volume de 1,14 m<sup>3</sup> selecionado (como referido anteriormente) para as pilhas de compostagem, foi possível calcular a quantidade de cada resíduo que cada pilha deveria receber, as quais se referem na Tabela 12. Para cada mistura de resíduos foram realizadas 2 pilhas de compostagem, no sentido de possibilitar a comparação de resultados e observar possíveis acontecimentos anómalos. Deste modo, neste documento, ao arreferir o número da mistura (1, 2 ou 3) indicar-se-á também a letra correspondente à réplica (a ou b).

**Tabela 12 – Valores obtidos para a massa de cada material e de cada mistura.**

Resíduo	Massa de cada material (kg)			Massa total (kg)	Massa total (t)
	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3		
<b>Lama</b>	798,0	570,0	570,0	1938,0	1,94
<b>Estilha</b>	102,6	171,0	270,8	544,4	0,54
<b>Cinza</b>	28,7	47,9	23,9	100,5	0,10
<b>Ração</b>	22,2	37,1	0,0	59,3	0,06
<b>Silagem</b>	16,0	26,7	0,0	42,7	0,04
<b>Total</b>	968	853	865	2685	2,7

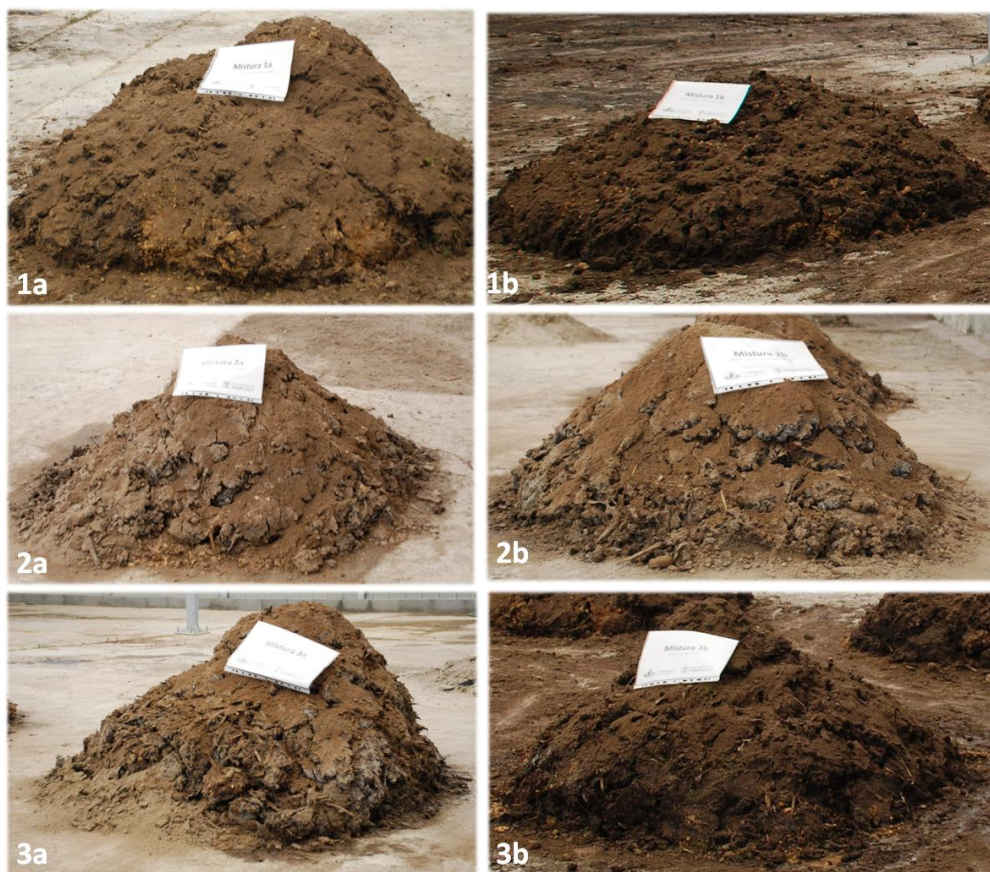
## **b. Tamanho, Configuração e Medidas**

O tamanho mínimo de pilhas a adotar para que o processo seja considerado compostagem é 1 m<sup>3</sup> [28]. A utilização de pilhas com largura correspondente a cerca do dobro da altura, é sugerida por Gonçalves, M.S. [3], sendo o seu máximo aconselhado de 2 a 2,5 metros. Já Kreith, F. e G. Tchobanoglous [25] aconselham altura de cerca de 1,5 e 1,8 metros e largura de 2,4 a 2,7 metros.

A configuração da pilha depende não só do espaço disponível, mas também das condições climáticas a que está exposta [25]. Em locais onde as pilhas estão expostas à chuva, devem apresentar uma configuração cónica para permitirem o escoamento da água. Em locais cobertos, onde a precipitação não apresenta problema, as pilhas podem ser de topo achatado, não bicudo, por onde a perda de calor é menor [25].



No caso em questão, para determinação do tamanho e configuração das pilhas teve-se também em conta a quantidade de material disponível e o tipo de tecnologia que a empresa tinha estipulado para o seu processo, de modo a que, no final, a experiência pudesse ser reproduzida usando a mistura com melhores resultados. Assim, construíram-se pilhas de perfil trapezoidal, de base quadrada com 1,2 metros de lado (base maior do trapézio), altura de 1 metro e topo com 0,7 metros (base menor do trapézio). Assim, obtiveram-se pilhas com 1,14 m<sup>3</sup> de volume (Figura 22).



**Figura 22 – Visualização da forma das pilhas construídas: 1a e 1b – pilhas com mistura de 70 % de lamas e 30 % de restantes resíduos; 2a e 2b – pilhas com mistura de 50 % de lamas e 50 % de restantes resíduos (na mesma proporção que na mistura 1); 3a e 3b - pilhas com mistura de 50 % de lamas e 50 % de restantes resíduos, maioritariamente estilha.**

### **c. Construção**

Em relação ao método de construção das pilhas de compostagem pode ser usada uma pré-mistura, em que os materiais são previamente misturados e só depois empilhados, ou pode ser realizada uma deposição em camadas. A escolha depende do sistema de compostagem selecionado, sendo que, se incluir revolvimento, a pilha pode ser construída

alternando camadas de resíduos, pois, após o 1º e 2º revolvimentos, a homogeneização da mistura já foi atingida <sup>[25]</sup>.

Uma vez que o sistema escolhido foi o de pilhas revolvidas, a sua construção foi realizada em camadas, seguida de um primeiro revolvimento para homogeneizar os diferentes materiais.

A receção dos materiais não foi realizada em simultâneo. Todavia, aquando da construção das quatro pilhas referentes às misturas 1 e 3, as cinzas ainda não estavam disponíveis, sendo que os únicos resíduos disponíveis eram a lama, a estilha, a silagem e ração. Deste modo, a cinza foi utilizada como cobertura para auxiliar a manutenção do calor no interior da pilha. No primeiro revolvimento esta foi incorporada na mistura.

O processo de construção das pilhas está representado na Figura 23. Na Figura 24 está representada a sequência de resíduos adicionados. Começou por se aplicar uma base de pré-mistura de lamas com 18 % de castanhos com cerca de 15 centímetros de altura, em seguida foi adicionada uma camada de ração, uma de silagem e uma de verdes. Após uma nova camada de pré-mistura o procedimento repetiu-se até que a utilização de todos os resíduos destinados à pilha em construção atingisse uma altura de cerca de 1 metro.



Figura 23 – Construção de uma das pilhas



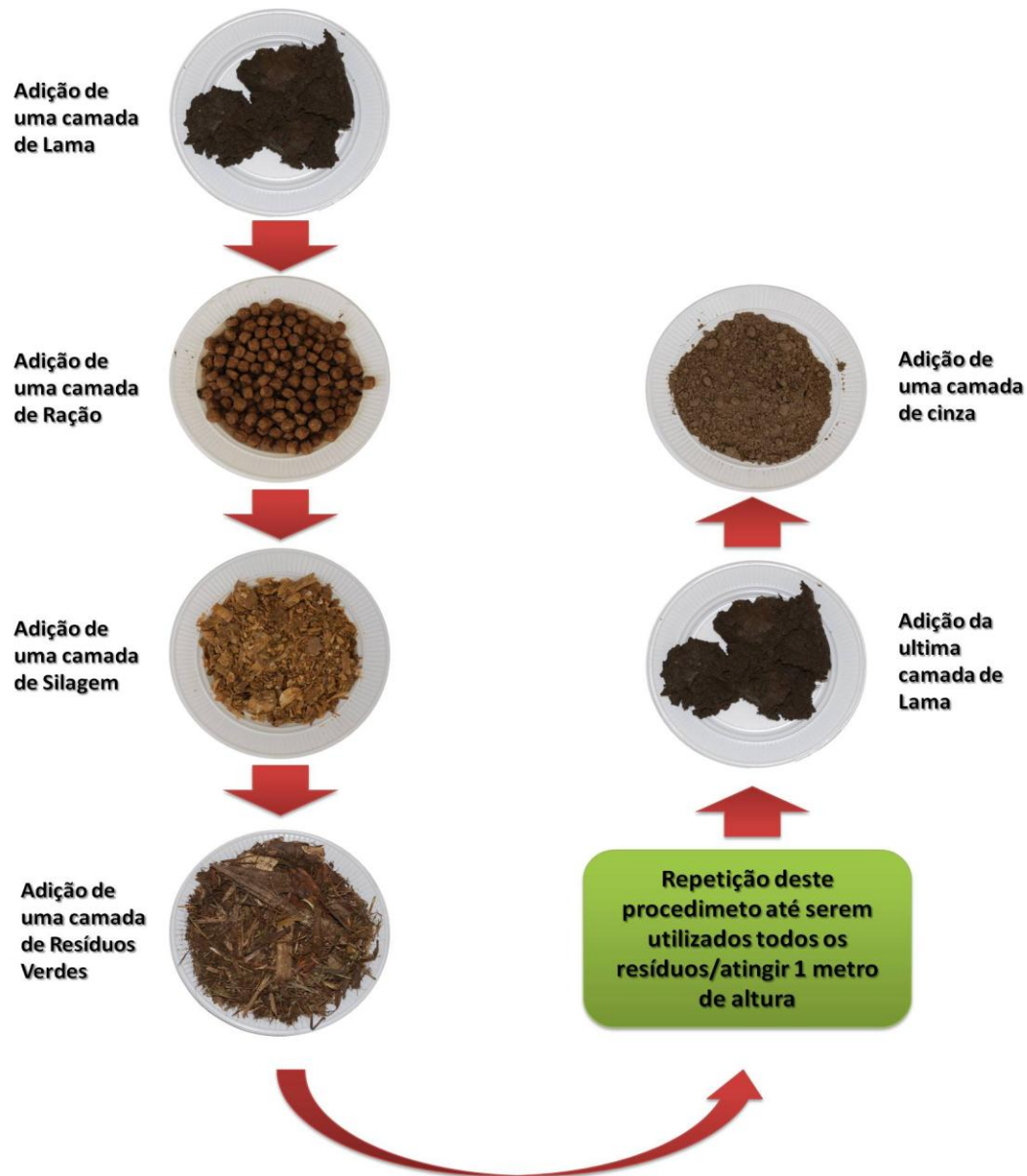


Figura 24 – Esquema da sequência de materiais a adicionar ao longo da construção das pilhas de compostagem.

### 2.2.1.3 Resíduos

#### a. Dimensão

As sugestões de tamanho de partículas variam consoante o autor, sendo que o intervalo é sempre bastante próximo. A Tabela 13 resume os valores sugeridos por diferentes autores. Felícia, D.G. <sup>[77]</sup> sugere uma granulometria entre os 2 e os 7 centímetros, valor este semelhante ao sugerido por Batista, J.G.F. e Batista, E.R.B. <sup>[27]</sup> de 1,3 a 7,6 centímetros, sugerindo este último autor o valor mínimo de 1,3 cm para utilização em sistemas de ventilação forçada ou sistemas mistos contínuos e o valor máximo de 7,6 cm para sistemas em pilhas ou outros sistemas de ventilação passiva.

Gonçalves, M.S. <sup>[3]</sup> recomenda granulometria na gama de 1,2 a 7 centímetros para materiais predominantemente lenhino-celulósicos. Já a empresa CalRecovery Inc. <sup>[95]</sup> sugere diferentes granulometrias, consoante o tipo de material, aconselhando tamanhos compreendidos entre 1,5 a 5 centímetros para os materiais, em geral, 5 a 10 centímetros para materiais fibrosos (resíduos castanhos) e 15 centímetros para materiais verdes muito frescos. Também Kreith, F. e G. Tchobanoglous <sup>[25]</sup> sugerem valores para materiais fibrosos e materiais verdes muito frescos de 1,3 a 5 centímetros e 5 a 15 centímetros, respetivamente. O autor Epstein, E. <sup>[23]</sup> propõe a utilização de partículas de agente estruturante com tamanhos compreendidos entre 2,5 e 3,8 centímetros.

Tabela 13 – Calibre das partículas dos materiais da mistura a compostar.

Referência	Tamanho médio das partículas (cm)	Resíduos
Felícia, D.G. <sup>[77]</sup>	2 e os 7	Resíduos em geral
Gray <i>et al.</i> <sup>[96]</sup> (citando por Batista, J.G.F. e Batista, E.R.B. <sup>[27]</sup> )	1,3 a 7,6	Resíduos em geral
Gonçalves, M.S. <sup>[3]</sup>	1,2 a 7	Resíduos predominantemente lenhino - celulósicos
CalRecovery Inc. <sup>[95]</sup>	1,5 a 5	Resíduos em geral
	5 a 10	Resíduos fibrosos (resíduos castanhos)
	15	Resíduos verdes muito frescos
Kreith, F. e G. Tchobanoglous <sup>[25]</sup>	1,3 a 5	Resíduos fibrosos
	5 a 15	Resíduos verdes muito frescos
Epstein, E. <sup>[23]</sup>	2,5 a 3,8	Agente estruturante
Brito, L.M. <sup>[36]</sup>	2 a 8	Resíduos em geral

Nem todas as tipologias de materiais utilizados permitem conhecer ou manusear a granulometria, tal como é o caso das lamas. Por isso, face à impossibilidade de manipular a granulometria dos restantes resíduos optou-se por definir o calibre da estilha, para melhorar o mais possível o processo. Por outro lado, no sentido de reduzir custos do processo, a escolha da granulometria não se circunscreveu a uma gama muito estreita, mas a um conjunto de calibres bastante heterogéneo entre 1 e 10 cm. A presença de materiais de maior calibre permitiu promover a estrutura da mistura e facilitar a oxigenação, podendo ser necessária a sua remoção no final do processo. O tamanho das partículas de ração está compreendido entre 0,5 e 1 cm, consoante a humidade apresentada, não fazendo sentido a sua diminuição uma vez que a mistura precisa de material que lhe adicione estrutura.

Pela Figura 25 é possível a comparação visual da granulometria dos resíduos utilizados nas várias misturas



Figura 25 – Imagem dos resíduos utilizados para comparação de granulometria.

#### b. Microbiologia

Se o processo for devidamente controlado é possível extinguir todos os agentes patogénicos, raízes e sementes no seu decurso. No sentido de atingir este requisito, a temperatura deve ser mantida entre 60 e 70 °C por um período mínimo de 24 h, segundo Insam, H. & M. Bertoldi<sup>[29]</sup>. O documento das *Especificações Técnicas sobre qualidade e Utilizações do Composto*<sup>[15]</sup> expõe, no Anexo III referente às recomendações para a higienização do composto, que “*num sistema de pilhas revolvidas ... os resíduos deverão estar submetidos durante, pelo menos, 4 semanas a condições de temperatura e humidade superiores a 55 °C...*”. Na Tabela 14 estão enumeradas as temperaturas e tempos de exposição específicos, necessários para a destruição de alguns dos agentes patogénicos e parasitas mais comuns.

Uma vez que uma das lamas a utilizar no processo de compostagem conta com a presença de *Salmonella* spp e *Escherichia Coli*, é necessário o cumprimento de alguns requisitos mínimos:

***Salmonella* spp** – 1 h a 55 °C ou 15 a 20 minutos a 60 °C <sup>[17]</sup>.

***Escherichia Coli*** – 1 h a 55 °C ou 15 a 20 minutos a 60 °C <sup>[17]</sup>.

**Tabela 14 – Temperatura e tempo de exposição necessários para a destruição de alguns dos agentes patogénicos e parasitas mais comuns (adaptado de Tchobanoglous, G. *et al* <sup>[17]</sup>).**

Organismo	Observações
Salmonella typhosa	Não cresce para além de 46 °C; morte com 30 min a 55 – 60 °C ou com 20 min a 60 °C; destruída num curto espaço de tempo de compostagem.
Salmonella sp.	Morte com 1 h a 55 °C ou 15 a 20 min a 60 °C.
Shigella sp.	Morte com 1 h a 55 °C.
<i>Escherichia Coli</i>	Morte com 1 h a 55 °C ou 15 a 20 min a 60 °C.
Entamoeba histolytica cysts	Morte com alguns minutos a 45 °C ou com alguns segundos a 55 °C.
Taenia saginata	Morte com alguns minutos a 55 °C.
Trichinella spiralis larvae	Rapidamente morta a 55 °C; instantaneamente morta a 60 °C.
Brucella abortus or Br. suis	Morte com 3 min a 62 – 63 °C ou 1 h a 55 °C.
Micrococcus pyogenes var. Aureus	Morte com 10 min a 50 °C.
Streptococcus pyogenes	Morte com 10 min a 54 °C.
Mycobacterium tuberculosis var. hominis	Morta com 15 – 20 min a 66 °C ou depois de aquecimento momentâneo a 67 °C.
Corynebacterium diphtheriae	Morte com 45 min a 55 °C.
Necator americanus	Morte com 50 min a 45 °C.
Ascaris lumbricoides eggs	Morte em menos de 1 h a temperatura superior a 50 °C.

### c. pH

Segundo Diaz, L. F. e Savage, G. M. <sup>[39]</sup> e Epstein, E. <sup>[44]</sup> a gama de pH em que o processo de compostagem pode acontecer é normalmente bastante abrangente (de 3 a 11), apesar de a gama ideal variar entre 5,5 e 8,0. As bactérias preferem pH quase neutro e os fungos desenvolvem-se melhor num ambiente ácido. Já Tchobanoglous, G. *et al.* <sup>[17]</sup> recomenda a utilização de pH entre 6 e 9, sendo ideal que o valor se mantenha entre 7 e 7,5.

Estes autores, juntamente com Kreith, F., sugerem valores de pH entre 5,5 e 7,5 para o desenvolvimento de bactérias e valores entre 5,5 e 8 para os fungos.

Segundo o British Columbia Ministry of Agriculture and Food <sup>[43]</sup> a gama de pH ótima para os microrganismos envolvidos na compostagem situa-se entre 6,5 e 7,5.

Quando associados a valores elevados de temperatura, valores de pH altos podem levar a perdas significativas de azoto através da volatilização na forma de amoníaco <sup>[39]</sup>.

Tendo em conta os limites abrangentes referidos para este parâmetro e o facto de os pH mais extremos serem o da lama (pH 9) e o da silagem (pH entre 3,5 e 4 <sup>[92]</sup>), esta utilizada em pequena quantidade, podendo promover uma leve descida, até favorável, no pH da mistura, não foi necessário fazer nenhuma alteração.

#### **d. Revolvimento**

Numa situação ideal, o revolvimento deve ser realizado destruindo a pilha em questão e, em seguida, reconstruindo-a. Desta forma, ao fim de cada revolvimento, a camada mais exterior da pilha anterior passaria a ser a camada mais interior da nova, permitindo que todo o material atravessasse as mesmas condições <sup>[25]</sup>. No processo de reconstrução da pilha é imperativo que se evite a compactação do material <sup>[25]</sup>.

A frequência de revolvimento é um parâmetro a controlar uma vez que é necessário que os microrganismos tenham oxigénio disponível para se desenvolverem e degradarem o material. Deste modo, o revolvimento de 3 em 3 dias é considerado suficiente por Kreith, F. e G. Tchobanoglous <sup>[25]</sup> para fazer face ao consumo de O<sub>2</sub>.

Neste caso tentou-se que o revolvimento fosse realizado com o auxílio de uma máquina revolvedora de marca BACKHUS, modelo 16.30. Uma vez que a dimensão da experiência não permitiu a sua utilização, o revolvimento foi realizado com o auxílio de pás e enxadas, tentando que em cada revolvimento o material que se encontrava no exterior passasse a estar no interior da pilha.

A frequência foi determinada pela medição da temperatura, impondo-se que, sempre que ultrapasse 60°C durante mais do que 1 hora se deve realizar um revolvimento. Também, quando após subida da temperatura, esta começar a descer, deve ser realizado novo revolvimento para obstar a que a descida de temperatura não seja devida à compactação do material e consequente formação de zonas de anaerobiose.

## 2.2.2 Controlo do processo

Como forma de controlar o desenvolvimento do processo, foram medidos os parâmetros temperatura e humidade ao longo do tempo.

### 2.2.2.1 Temperatura

A medição de temperatura foi realizada utilizando um conjunto de sensores de termopar, ligados a um sistema de aquisição de dados, com medições de 15 em 15 minutos (Figura 26). Os valores obtidos nestas medições foram utilizados para definir os momentos de revolvimento do material. Um equipamento de imagem termográfica foi também utilizado para possibilitar a visualização da distribuição de temperaturas na superfície da pilha.

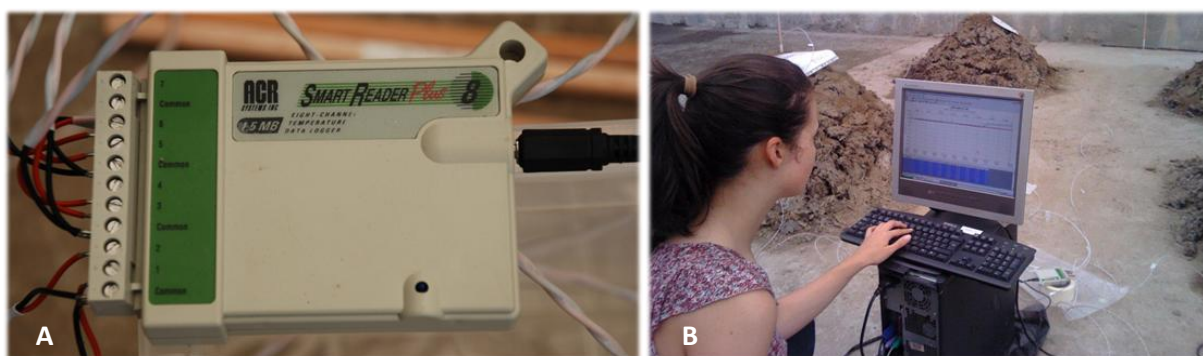


Figura 26 – A – Datataker – Estação de medição de temperatura; B – Computador para aquisição de dados.

### 2.2.2.2 Humidade

Normalmente, um teor de humidade de aproximadamente 60 % no material é considerado satisfatório, apesar desta generalização não ser sempre a mais correta, uma vez que os diferentes materiais contam com diferentes capacidades de retenção de água <sup>[39]</sup>. A atividade microbiana diminui quando o nível de humidade no composto se encontrar abaixo de 40 %, significando a desidratação do material inicial, e torna-se praticamente nula se atingir valores iguais ou inferiores a 20 %, resultando num composto fisicamente estável, mas biologicamente instável <sup>[39]</sup>.

Para a medição da humidade foi utilizado o método de secagem em estufa com pesagem anterior e posterior. Este método é explicado no subcapítulo seguinte.

### 2.2.3 Determinação da Qualidade do Composto

A determinação da qualidade do composto não foi possível em amostras de todas as pilhas. Uma vez que uma parte das análises é bastante dispendiosa, para as análises mais acessíveis foram analisadas amostras de todas as pilhas, mas para as análises mais caras só foram analisadas amostras das duas pilhas que mostraram ter atingido um estágio mais avançado de compostagem, isto é, temperaturas mais elevadas e humidade mais reduzida.

Para além de todas as análises referidas de seguida, foi enviada uma amostra da pilha 2a, correspondente à mistura com 50 % de ambas as parcelas de material (lama e restantes resíduos) para análise no Laboratório do ISQ – LABQUI.

#### 2.2.3.1 Amostragem

##### **Procedimento experimental para amostragem:**

1. Marcaram-se os recipientes com o número da amostra e a respetiva data.
2. Foi realizada a recolha, utilizando o equipamento de escavação adequado (pá), de 1 amostra de composto na quantidade e no local da pilha de compostagem pré-definidos.
3. Após o acondicionamento de cada amostra no respetivo saco plástico foi realizada a sua selagem com um nó e uma corda, para impedir contaminação ou perda de amostra.

Nota: Para o acondicionamento e transporte das amostras foram adotados os cuidados necessários para que não ocorresse rotura/contaminação dos sacos.

##### **Etiquetagem:**

Nº da pilha – Termopar associado
Data de recolha da Amostra

No Anexo VIII está representado esquematicamente o procedimento de amostragem.

### 2.2.3.2 Parâmetros físicos

#### a. Humidade

A análise da humidade das amostras foi realizada segundo a Norma EN 13040:1999 por gravimetria (secagem a  $100 \pm 5$  °C em estufa até peso constante)

##### **Procedimento experimental:**

1. Marcação dos vidros de relógio com o número da amostra e a respetiva data.
2. Realizou-se a pesagem de cada vidro de relógio, utilizando uma balança analítica.
3. Utilizando a balança analítica, pesou-se cada vidro de relógio com a respetiva amostra.
4. Colocou-se os conjuntos vidro de relógio/amostra na estufa, a  $105 \pm 2$ °C durante cerca de 12 horas (durante a noite).
5. Transferiu-se os conjuntos para o exsicador deixando-se arrefecer durante cerca de 1 hora.
6. Na pesagem foi verificado se apresentam peso contante (quando apresentaram peso constante, registou-se o peso, quando ocorreu variação do peso, voltou-se a colocar na estufa, procedendo mais tarde a este ponto de confirmação novamente).
7. Repetiu-se o procedimento 6. até peso constante.

##### **Expressão dos resultados:**

O teor em humidade é dado por:

$$H = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \times 100$$

em que:

H – Humidade (%)

$M_1$  – é o peso da amostra e vidro de relógio (g)

$M_2$  – é o peso da amostra seca e vidro de relógio (g)

$M_3$  – é o peso do vidro de relógio (g)

A folha de registo dos resultados encontra-se no Anexo IX.



## b. Granulometria

### Procedimento experimental:

1. Montou-se o conjunto de peneiras sobre a Peneiradora Vibratória, sobrepondo-as por ordem crescente de abertura de malha;
2. Pesou-se em duplicado aproximadamente 100 g da amostra (P) e transferiu-se para o topo do conjunto de peneiras.
3. Colocou-se a tampa no topo da pilha de peneiras e prendeu-se firmemente à Peneiradora Vibratória;
4. A intensidade de vibração foi ajustada e realizou-se o peneiramento durante 10 minutos;
5. Foram pesadas individualmente as frações de material em cada peneira (Figura 27). A limpeza dos peneiros entre análises foi sempre muito cuidadosa, utilizando ar comprimido em casos de maior dificuldade de remoção das partículas.



Figura 27 – Exemplo de duas frações acumuladas nos peneiros 14mm (esquerda) e 2mm (direita).

6. Para calcular a percentagem do composto retido em cada peneira (% R) foi utilizada a seguinte expressão:

$$Fração_{>x}(\%) = \frac{M_{retida\ no\ peneiro\ x} \times 100\ %}{M_{Total}}$$

Onde:

$Fração_{>x}(\%)$  = Percentagem retida na peneira de malha x;

$M_{Total}$  = Massa total de amostra.

### 2.2.3.3 Análises Químicas

#### a. Mercúrio

A determinação do mercúrio foi realizada utilizando a técnica de absorção atômica com vapor-frio (leitura a 253,7 nm), para a qual foi realizada uma digestão prévia com uma solução ácida e oxidação com permanganato para converter todo o mercúrio a mercúrio inorgânico.

##### **Procedimento experimental:**

1. Pesou-se  $1,00 \pm 0,05$  g (numa base de peso seco) de cada amostra e colocou-se num balão de vidro Kjeldahl (exceto no balão destinado ao branco) (pesos exatos na Tabela 15);
2. Adicionou-se, lenta e cuidadosamente,  $10,0 \pm 0,5$  mL de solução 50% (V/V) de ácido nítrico e ácido sulfúrico em cada balão de vidro Kjeldahl (incluindo no balão destinado ao branco);
3. Tapou-se o topo do balão com vidro de relógio para que o vapor pudesse condensar e voltar para a solução.
4. Colocou-se em banho de água quente, a  $60 \pm 20$  °C, para que a água cobrisse toda a área de balão que continha solução no seu interior, durante 2 horas.
5. Removeram-se os balões do banho e deixou-se arrefecer.
6. Colocou-se  $20 \pm 0,5$  mL de água destilada em cada um dos balões de vidro Kjeldahl.
7. Adicionou-se lentamente  $5,0 \pm 0,1$  mL de solução 6% (m/V) permanganato de potássio (de cor roxa) e agitou-se (adicionou-se esta solução de 5,0 em 5,0 mL até o máximo 15 mL até que se atingisse a cor roxa).
8. Depois de bem agitadas as amostras, e fechados os balões, foram deixados em repouso durante um período de pelo menos 15 horas (durante a noite).
9. Passado o período de espera, foram colocados  $2 \pm 0,1$  mL de solução de cloreto de hidroxilamónio em todos os balões volumétricos levando ao desaparecimento da cor (se a cor não tivesse desaparecido seria necessário adicionar outros  $2 \pm 0,1$  mL da mesma solução até que fosse perdida toda a coloração).
10. As amostras foram filtradas e os balões e filtros bem lavados com água destilada até o balão da amostra filtrada conter cerca de 100 mL. Uma vez que ao proceder ao enchimento dos balões com o filtrado algumas amostras ultrapassaram os 100

mL, foram registadas as quantidades reais da mesma para ajuste final de cálculos (Tabela 15).

**Tabela 15 – Número de amostra, pilha de onde foi retirada a amostra e massa de amostra utilizada.**

Amostra	Pilha	Massa (g)	Volume após filtração (mL)
1	2a	1,033	100
2	2a	1,0087	103,3
3	2b	1,0679	101,5
4	2b	1,0310	103,1
5	Branco	-	-

11. Colocaram-se as soluções de ácido clorídrico e cloreto de estanho nos respetivos frascos.
12. Colocou-se a lâmpada de mercúrio e a célula de absorção no espectrofotómetro. Ligou-se o equipamento no comprimento de onda de 253,7 nm. Ligou-se o equipamento de vapor-frio e o árgon (gás inerte de arraste) num caudal de 100 a 300 mL/min. Verificou-se se o caudal de aspiração da amostra e do ácido era de 7 a 8 mL/min e o caudal de cloreto de estanho de 2,5 a 3,5 mL/min. Deixou-se estabilizar o equipamento durante alguns minutos e procedeu-se à leitura da absorvância do branco, dos padrões e em seguida da amostra.
13. Após leitura do branco, realizou-se a leitura das soluções padrão por ordem crescente de concentração de mercúrio (Anexo X, Tabela X - 1), elaborando assim a reta de calibração (Anexo X, Figura X – 1), ambas apresentadas no Anexo XII.

## **b. Matéria Orgânica**

### **Procedimento experimental:**

A matéria orgânica foi determinada de acordo com a norma EN 12879:2000. Adotou-se o procedimento seguinte:

1. Pesou-se um cadinho de porcelana ( $m_{\text{cadinho}}$ );
2. Colocou-se no cadinho cerca de 2 g da amostra seca ( $m_{\text{amostra seca}}$ );
3. Colocaram-se os cadinhos na mufla a 550 °C, até peso constante (cerca de 2 horas);
4. Cerca de 1 hora após se desligar a mufla, retiraram-se os cadinhos com as cinzas para um exsicador, onde ficaram até estarem à temperatura ambiente;

5. Retiraram-se os cadinhos com as cinzas do exsicador e pesaram-se ( $m_{\text{cadinho} + \text{cinza}}$ );
6. Procedeu-se ao cálculo da percentagem de sólidos voláteis, utilizando as seguintes equações:

$$m_{\text{cinza}} = m_{\text{cadinho} + \text{cinza}} - m_{\text{cadinho}}$$

$$MO = \frac{m_{\text{amostra seca}} - m_{\text{cinza}}}{m_{\text{amostra seca}}} \times 100$$

Em que:

$m_{\text{cadinho}}$  – Massa do cadinho de porcelana (g)

$m_{\text{amostra seca}}$  – Massa da amostra seca (g)

$m_{\text{cadinho} + \text{cinza}}$  – Massa do cadinho com as cinzas (g)

$m_{\text{cinza}}$  – Massa das cinzas, em peso seco (g)

MO – Matéria orgânica, em peso seco (%)

Nota: Fizeram-se triplicados para cada amostra, de acordo com a quantidade de amostra disponível.

### c. Composição química

#### Procedimento experimental:

1. Peneirou-se o composto em malha de 150  $\mu\text{m}$ .
2. Uma vez que a granulometria do material era, em geral, bastante superior a 150  $\mu\text{m}$ , triturou-se o material para que se obtivesse material suficiente na granulometria desejada.
3. Colocou-se a quantidade de material necessária para cobrir a base da cápsula e ter cerca de 2 mm de altura de material.
4. Compactou-se bem o material e colocou-se uma rodela de papel para impedir que o material se movesse.
5. Fechou-se a tampa da cápsula e realizou-se a devida identificação com o número da amostra.
6. Realizaram-se as leituras no equipamento (seguindo a sequência demonstrada na Figura 28), sendo que cada uma durou 3 minutos.

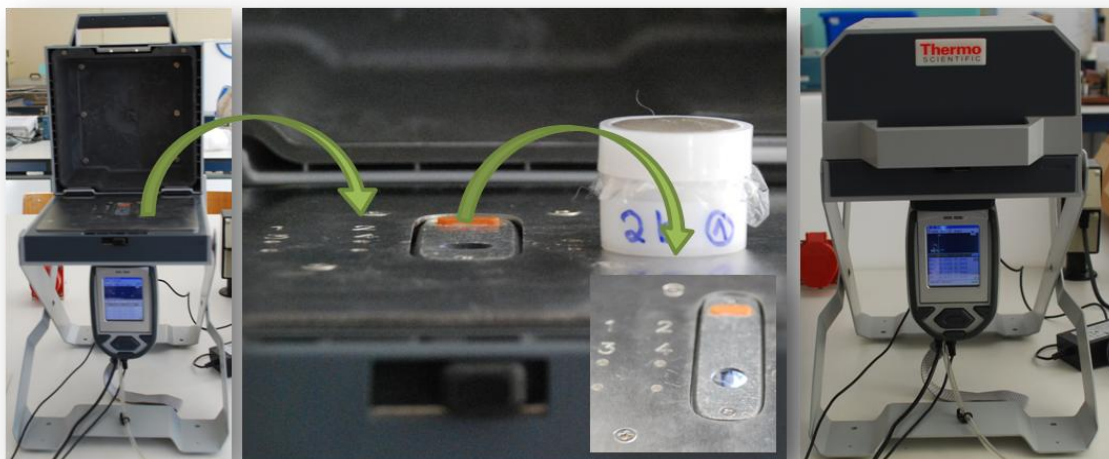


Figura 28 – Sequência de medição da composição química das amostras.

#### 2.2.3.4 Análises Microbiológicas

Para esta determinação utilizou-se a metodologia referida na ISO 9308-1:2000 – “Water quality - Detection and enumeration of *Escherichia Coli* and coliform bactéria”.

##### Preparação de soluções e meios:

1. Preparou-se 700 mL de meio de cultura Lauryl Sulphate Broth com a composição seguinte (cálculos no Anexo XI):
  - *Lauryl Sulphate Broth* (comercial) (Figura 29) – 76,2 g/L
  - Agar (Figura 29)– 10 g/L
  - Água destilada
- a. Colocou-se o meio de cultura e o Agar, nas quantidades acima referidas, num frasco Schott de 1000 mL, perpez-se com água destilada até 700 mL e levou-se a agitar num agitador magnético.
- b. Após esterilização, deixou-se arrefecer o meio até cerca de 50 – 55 °C, utilizando o agitador magnético para agitar o meio.
- c. Deitou-se, em condições de assepsia (junto à chama do bico de Bunsen), cerca de 15 mL de meio *Lauryl Sulphate Broth* em cada uma das caixas de Petri previamente esterilizadas (Figura 29).



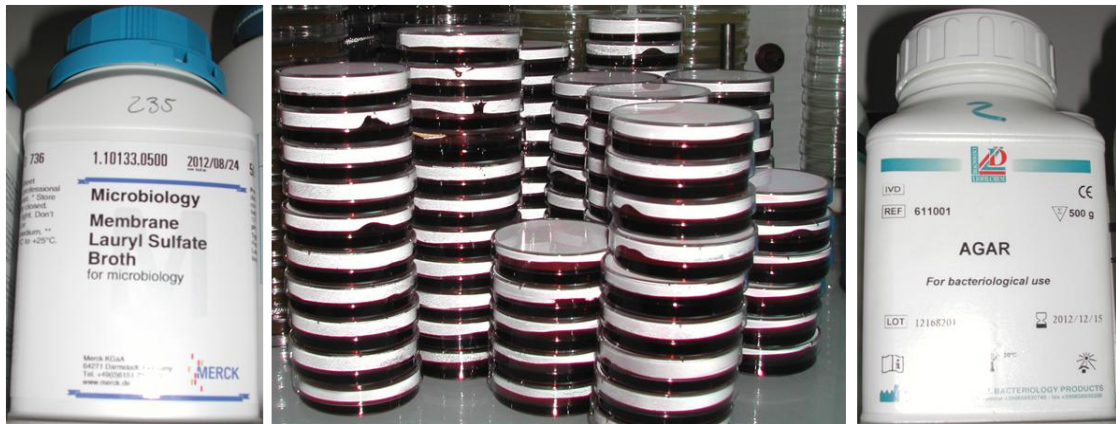


Figura 29 – Frasco com meio *Lauryl Sulfate Broth* em pó (esquerda); meio distribuído pelas placas de Petri (centro). Frasco com Agar em pó (direita).

d. Após solidificação do meio viraram-se as placas;

2. Preparou-se 200 mL de meio de cultura **Fluorocult** com a seguinte composição (cálculos no Anexo XI):

- *Fluorocult* (comercial) (Figura 30) –  $36,1 \frac{g}{L}$
- Água destilada –  $200 mL$

- a. Colocou-se o meio de cultura e a água destilada, nas quantidades acima referidas, num *gobelet* e levou-se a agitar num agitador magnético.
- b. Distribuiu-se o meio de cultura por tubos de ensaio com um tubo Duhran invertido, no seu interior, até que este ficasse submerso (Figura 30).



Figura 30 – Frasco com meio *Fluorocult* em pó (esquerda); tubos de ensaio com meio *Fluorocult* e tubo Durham invertido (direita).

- c. Após esterilização, deixou-se arrefecer.
3. Preparou-se 4 L de Solução Salina com a seguinte composição:
  - Cloreto de sódio
  - Água destilada
- a. Para a obtenção de uma solução com concentração 8,5 g/L, pesou-se 8,5 g de cloreto de sódio em Frascos Schott de 1 L.
- b. Perfez-se o volume com água destilada.

**Procedimento de preparação do material:**

1. Utilizou-se a solução salina de um dos Frasco Schott e colocou-se 90 mL desta solução em cada um dos frascos de 100 mL.
2. Colocou-se uma barra magnética no seu interior.
3. Inseriu-se 9 mL desta mesma solução salina em 60 tubos de ensaio.
4. Esterilizaram-se 6 copos de filtração

**Nota:** Todo o material utilizado foi esterilizado na autoclave a 121 °C (1 atm), durante 15 minutos (Figura 31).



**Figura 31 – Exterior da autoclave (esquerda); material no interior da autoclave (direito).**

**Início de análises microbiológicas do composto.**

1. Foram pesados cerca de 10,00 gramas de amostra de composto para 6 frascos Schott.
2. Nesses frascos foi colocado o conteúdo dos frascos de 100 mL, previamente esterilizados, contendo a solução salina.
3. Todos os frascos foram colocados em agitação durante cerca de 30 min (Figura 32).

4. Procedeu-se à diluição das soluções obtidas.



Figura 32 – Equipamento onde foi realizada a agitação das amostras.

**Diluições para obtenção dos seguintes volumes de amostra por volumes de solução –  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$ .**

1. Colocou-se 1 mL de amostra no 1º tubo de ensaio com 9 mL de salina.
2. Retirou-se 1 mL, após agitação em vórtice, desse tubo de ensaio e colocou-se no 2º tubo de ensaio com 9 mL.
3. Após agitação em vórtice, retirou-se 1 mL desse tubo de ensaio e colocou-se no 3º tubo de ensaio com 9 mL. Após agitação em vórtice, retirou-se 1 mL desse tubo de ensaio e colocou-se no 4º tubo de ensaio com 9 mL. Após agitação em vórtice, retirou-se 1 mL desse tubo de ensaio e colocou-se no 5º tubo de ensaio com 9 mL.

**Procedimento de Filtração:**

4. Filtrou-se 1 mL de amostra de cada um dos tubos de ensaio através da membrana de filtração (0,45  $\mu$ m de porosidade e 47 mm de diâmetro) usando todos os instrumentos necessários ao processo (Figura 33).
5. Transferiu-se a membrana de filtração de cada filtração para a placa com meio *Lauryl Sulphate Broth*, previamente preparada e devidamente numerada.



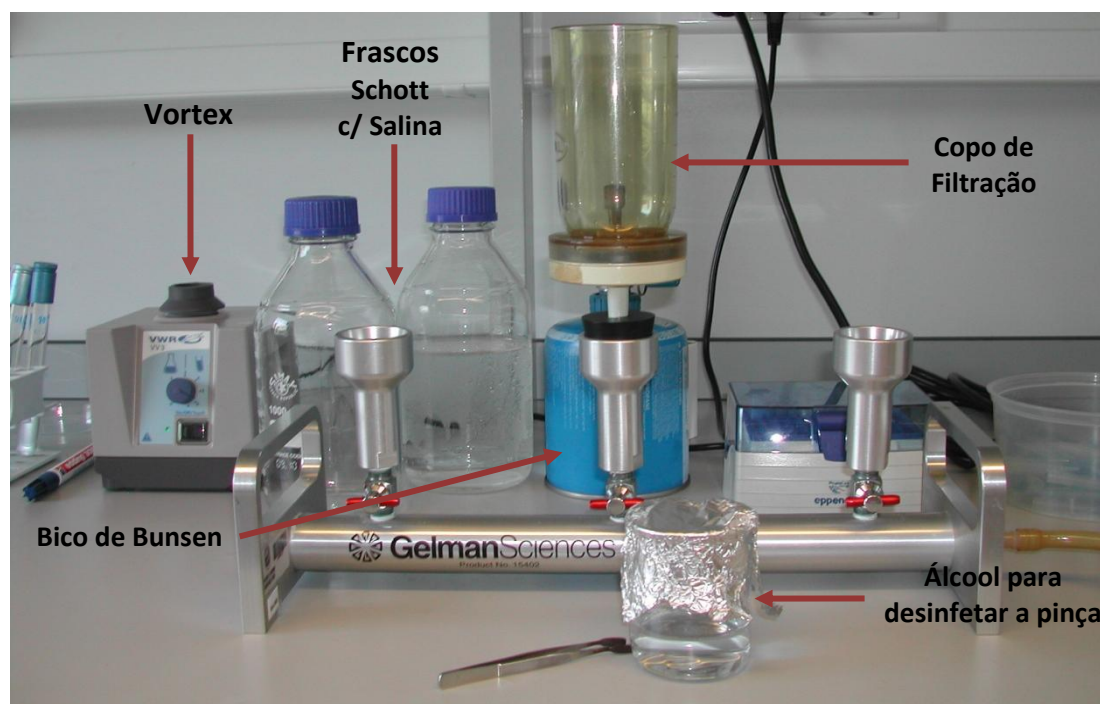


Figura 33 – Materiais utilizados na filtração.

**Procedimento de verificação da presença de *Escherichia Coli* em meio presuntivo (*Lauryl Sulphate Broth*)**

1. Incubou-se as placas com meio *Lauryl Sulphate Broth* e as membranas de filtração durante 4 h a 30 °C e 14 h a 44 °C, respetivamente.
2. Após este período, verificou-se a presença de colónias amarelas, sendo que quando apareceram colónias amarelas, considerou-se positiva a presença de *E. Coli*.

**Procedimento de Verificação da presença de *Escherichia Coli* em meio confirmativo (*Fluorocult*)**

1. Repicou-se uma colónia para um tubo de ensaio com meio *Fluorocult*;
2. Incubou-se durante 24h (ou 48 h, se necessário) a 35 °C.
3. Quando o meio passou de roxo para amarelo, considerou-se positiva a presença de *Escherichia Coli*
4. Verificou-se a presença de gás no interior do tubo de fermentação, considerando que quando presente, indicava teste positivo.

#### **Procedimento de Verificação da Fluorescência**

1. No final das 24 horas de incubação colocou-se o tubo de ensaio de meio conservativo na câmara de UV a 366 nm.
2. Quando não se verificou fluorescência incubou-se mais 24 h (perfazendo 48 h de incubação) e repetiu-se o procedimento.
3. Quando for verificada a fluorescência considerou-se o teste positivo.

#### **Procedimento teste da índole**

1. Adicionaram-se umas gotas de reagente Kovacs ( $\pm 5$  mm) ao tubo de ensaio do procedimento anterior e verificou-se se aparecia cor vermelha ao fim de 1 a 2 minutos.
2. Quando ocorreu o aparecimento dessa auréola vermelha, considerou-se o teste positivo.

### **2.2.3.5 Análises de Fitotoxicidade**

A análise da fitotoxicidade foi realizada tendo por base estudos referidos na bibliografia<sup>[97, 98]</sup>. Para esta análise só foi utilizada a mistura 2 (50 % lama/50% restantes resíduos), tendo sido utilizada uma amostra da pilha 2a e outra da pilha 2b.

#### **Procedimento experimental**

1. Mediu-se a quantidade de cada constituinte para a amostra em questão tendo em conta que cada vaso, para que o pé de alface coubesse, leva 70 mL de material (Tabela 16);
2. Realizou-se a mistura com o auxílio de dois copos invertidos.
3. Colocou-se metade do material no vaso, seguido do pé de alface, completando-se por fim o vaso com a restante mistura.
4. Por fim, realizou-se a rega de todas as plantas.

Nota: O crescimento das alfaces foi acompanhado fotograficamente e através da medição da sua folha maior.

**Tabela 16 – Proporções utilizadas em cada vaso.**

	<b>Terra (%)</b>	<b>Composto (%)</b>	<b>Pilha</b>	<b>Turfa (%)</b>
<b>1</b>	33	33	2a	33
<b>2</b>	33	33	2a	33
<b>3</b>	33	33	2b	33
<b>4</b>	33	33	2b	33
<b>5</b>	60	30	2a	10
<b>6</b>	60	30	2a	10
<b>7</b>	60	30	2b	10
<b>8</b>	60	30	2b	10
<b>9</b>	30	60	2a	10
<b>10</b>	30	60	2a	10
<b>11</b>	30	60	2b	10
<b>12</b>	30	60	2b	10
<b>13</b>	100	0	-	0
<b>14</b>	67	0	-	33
<b>15</b>	0	100	2a	0



### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Controlo do Processo de Compostagem

O processo de compostagem teve início no dia 23 de Maio de 2012 e foi finalizado no dia 18 de Julho. No entanto, manteve-se o equipamento de medição da temperatura para permitir alguma informação relativamente ao comportamento, após o período de compostagem em estudo. Tal como já foi referido no subcapítulo 2.1 – *Métodos*, para além das análises realizadas aos dois compostos provenientes das melhores pilhas (um da pilha a e outro da pilha b da mistura em questão), foi realizada uma análise em laboratório externo à amostra a acima referida.

Todos os resultados referidos de seguida, exceto o da temperatura uma vez que se trata de uma monitorização em contínuo, foram obtidos após um processo de amostragem, tal como é exemplificado na Figura 34.



Figura 34 – Processo de amostragem.

##### 3.1.1 Temperatura

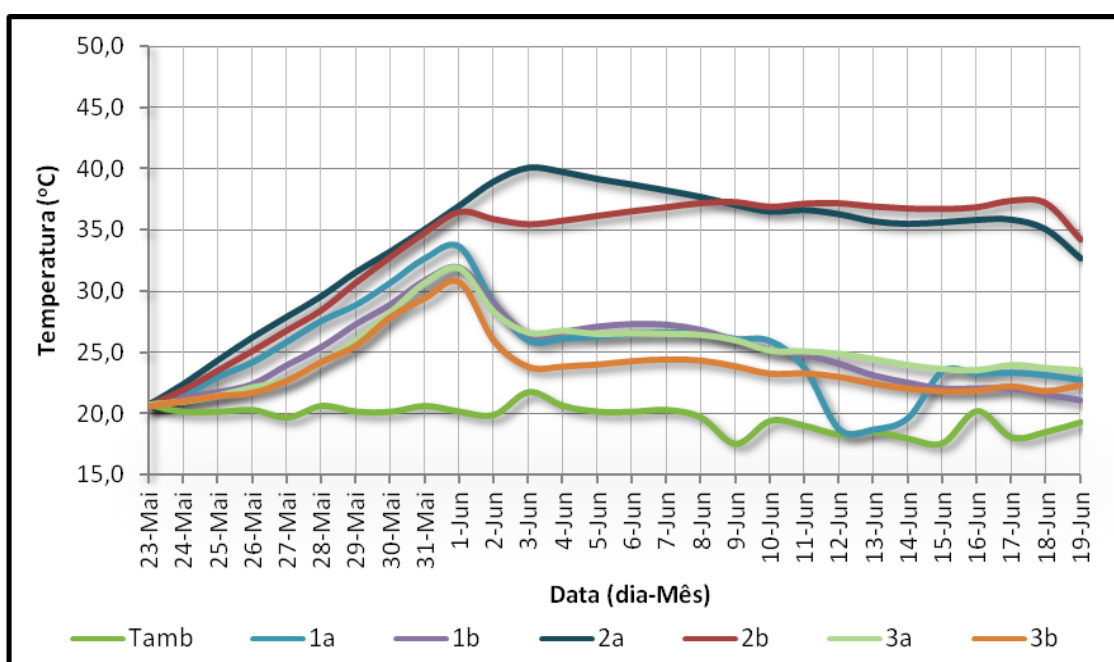
Durante o processo de compostagem, a temperatura é uma variável chave uma vez que determina a taxa de crescimento, a atividade metabólica e a comunidade dos organismos que realizam a decomposição. Influencia também a sobrevivência dos agentes patogénicos presentes no composto (condiciona a desinfecção) e controla a taxa de degradação da matéria orgânica<sup>[39]</sup>.

Quando não se verifica o aquecimento inicial esperado significa que a decomposição aeróbia não foi estabelecida<sup>[38]</sup>.

A monitorização da temperatura foi realizada de forma contínua, com leituras de 15 em 15 minutos, tal como descrito no anterior capítulo.

No caso apresentado neste trabalho, a temperatura nunca chegou a atingir valores muito elevados durante todo processo de compostagem. O motivo pelo qual não se terão

atingido temperaturas mais elevadas foi, muito provavelmente, a perda de calor excessiva causada pelo reduzido tamanho da pilha <sup>[38]</sup>. A elevada exposição ao frio também pode ter contribuído para que tal comportamento se verificasse <sup>[38]</sup>. Aliás, é possível através da observação das Figuras 35 – 38, perceber a influência da temperatura ambiente na temperatura da pilha. Por exemplo no Figura 36, entre os dias 24 e 28 de Julho, observou-se uma subida de temperatura em todas as pilhas, coincidente com a subida da temperatura ambiente.



**Figura 35 – Temperaturas medidas desde a construção das pilhas (23 de Maio) até ao primeiro revolvimento (19 de Junho) no centro de cada pilha e temperatura ambiente (Tamb).**

Nesta primeira fase, anterior ao primeiro revolvimento, é possível observar uma subida inicial em todas as pilhas de compostagem, mais ou menos acentuada consoante a mistura de materiais. Já é possível distinguir a importância da utilização da silagem no desenvolvimento inicial da flora microbiana (poderá esta estar a atuar como inoculante) e, consequentemente, no aquecimento da pilha em questão (2a e 2b). Este fenómeno pode ser observado por comparação entre as pilhas com a mistura 2 (2a e 2b) e a mistura 3 (3a e 3b), uma vez que ambas apresentam uma proporção entre lama/restantes resíduos de 50 %, mas a mistura 2, nos 50 % de restantes resíduos tem 20 % de silagem de milho, resultando em 10% na mistura final e as pilhas com mistura 3 não têm silagem. Ainda a partir da comparação entre estas duas misturas (2 e 3) pode constatar-se que, para o arranque do processo, tem mais influência a adição da silagem do que dos resíduos estruturantes. Evidência disso é o caso da

mistura 3 em que 47,5% do total representa material estruturante, e, mesmo assim, o arranque do processo foi, vista a velocidade de subida da temperatura, bastante inferior.

Entre as réplicas das pilhas constituídas pela mistura 1 (1a e 1b), é verificável um comportamento coincidente até meados do dia 10 de Junho. A partir desse momento, até meados do dia 13 de Junho, pode observar-se uma descida da temperatura da pilha 1a, que essencialmente resultou de uma má colocação da sonda de medição. Uma vez que as sondas estavam fixas numa estaca que permitia que ficasse instalada a 40 cm do chão, numa das verificações realizadas, em que a estaca foi retirada e colocada novamente no lugar, a sonda soltou-se e, com o atrito do material no momento em que foi inserida, deslizou pela estaca, ficando junto à superfície, passando a fazer medição da temperatura ambiente. No levantamento de dados realizado dia 13 de Junho, essa situação foi identificada e corrigida. Assim, mal o erro foi corrigido, a temperatura voltou a subir para valores representativos do processo de compostagem. A análise dos resultados deve, por tal facto, ter em conta esta situação anómala.

No que diz respeito às réplicas da mistura 2 (pilhas 2a e 2b) verificou-se um comportamento semelhante, no sentido em que ocorreu uma subida mais evidenciada da temperatura no início do processo. Passados 8 dias desse início, a pilha 2a já tinha atingido 35 °C (31 de Maio), entrando na fase termofílica, e 40 °C, temperatura mais elevada atingida pelas pilhas de compostagem antes do primeiro revolvimento, no dia 3 de Junho, 12 dias após o arranque do processo. A pilha 2b demorou também 8 dias para entrar na fase termofílica, sendo que, antes do primeiro revolvimento, a temperatura mais alta que atingiu foi cerca de 37,5 °C. A diferença entre réplicas da mesma estrutura pode ser explicada, por exemplo, pela diferença entre a flora microbiana inserida com a silagem, que pode não ser homogénea, e pela própria homogeneização do material da pilha de compostagem ser ligeiramente diferente, fator que pode ter algum significado no desenvolvimento do processo, pelo menos até ao primeiro revolvimento.

Entre as réplicas de pilhas com a mistura 3, pilhas 3a e 3b, é observável um comportamento semelhante em termos de oscilações, mas entre elas é sempre mantida uma diferença de temperatura de cerca de 2 ou 3 °C. Uma vez que estas são as pilhas que apresentam maior quantidade de estruturante, estas sofrem alguma influência do ambiente que as rodeia, que pode conduzir a uma maior oscilação em termos de temperatura.

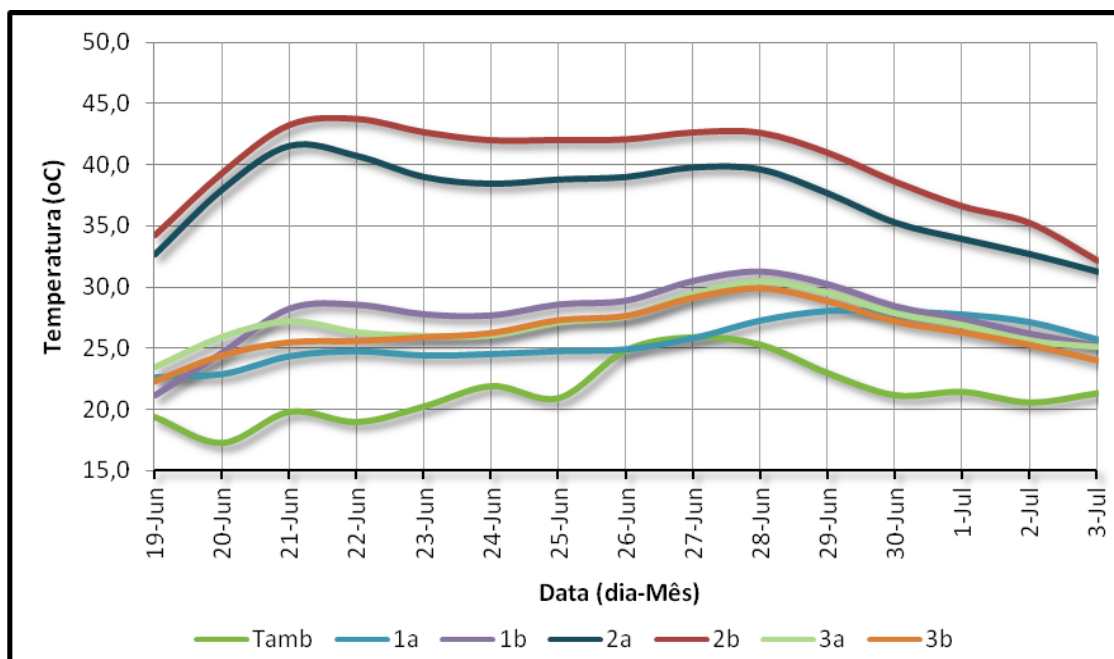


Figura 36 – Temperaturas medidas desde o primeiro revolvimento (19 de Junho) até ao segundo revolvimento (3 de Julho) no centro de cada pilha e temperatura ambiente (Tamb).

Após o primeiro revolvimento realizado dia 19 de Junho, 28 dias após o início do processo, a descida de temperaturas não foi muito significativa; nas pilhas com a mistura 2 foi de cerca de 5 °C, e nas restantes misturas, que já apresentavam temperaturas mais baixas, praticamente não é visível a influência do revolvimento, sendo que a mistura se manteve à mesma temperatura.

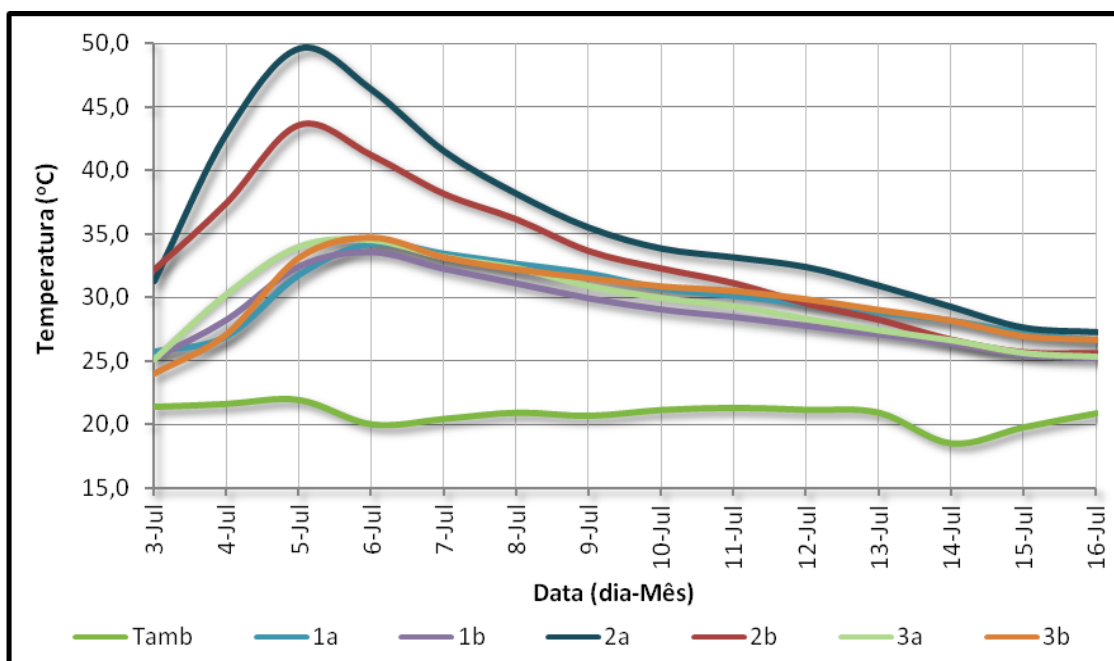
Nas pilhas da mistura 1, desde o revolvimento de dia 19 de Junho até ao realizado dia 3 de Julho, a variação da temperatura foi distinto. Este fenómeno pode ser explicado pela falta de estrutura desta mistura, que faz com que o acesso de oxigénio à flora microbiana seja muito dependente do revolvimento. Deste modo, bastou uma ligeira diferença entre o revolvimento realizado numa e noutra pilha para que surgissem diferenças de desenvolvimento dos agentes promotores da degradação.

Nas temperaturas das pilhas construídas com a mistura 2, pode verificar-se a ocorrência de oscilações semelhantes, apesar de apresentarem uma diferença de 2,5 ou 3 °C entre as suas temperaturas.

Também as medições efetuadas às pilhas constituídas pela mistura 3 apresentaram valores muito semelhantes, não só em termos quantitativos, mas em termos de variações ocorridas, exceto entre o dia 19 e 22 de Junho, em que a pilha 3a apresentou temperaturas ligeiramente mais elevadas. A pilha 3a foi a que manteve sempre temperaturas mais elevadas em comparação com as outras três pilhas que se mantiveram com temperaturas mais baixas (3b, 1a e 1b).



Mais uma vez o revolvimento foi realizado tendo em conta que a temperatura das pilhas estava a descer sem terem ainda atingido temperaturas suficientemente elevadas, necessárias à higienização do composto.



**Figura 37 – Temperaturas medidas desde o segundo revolvimento (2 de Julho) até ao terceiro revolvimento (16 de Julho) no centro de cada pilha e temperatura ambiente (Tamb).**

Após o revolvimento de dia 3 de Junho, todas as pilhas apresentaram uma subida de temperatura.

As pilhas constituídas pela mistura 1 e 3 apresentaram valores muito semelhantes de temperatura e oscilações da mesma ordem de grandeza durante os 13 dias até ao revolvimento seguinte. Todas apresentaram o valor mais elevado de temperatura no intervalo de 33 a 35 °C, sendo que foi a pilha 3b que atingiu a temperatura mais elevada entre as atingidas por estas quatro pilhas (35 °C).

Já de entre as pilhas constituídas pela mistura 2, a réplica “a” foi a que atingiu temperaturas mais elevadas (as mais distintas de todo o processo analisado) tendo chegado até 50 °C. A pilha 2b atingiu a temperatura máxima de 44 °C. Estas duas réplicas da mesma mistura tiveram oscilações de temperatura semelhantes, sendo que a diferença máxima foi de 7 °C. Após o dia 5 de Julho, em que foram atingidas as temperaturas mais elevadas nas pilhas de mistura 2 (50 °C), o valor deste parâmetro desceu até 27 e 25 °C na pilha 2a e 2b, respetivamente.

No dia 16 de Julho foi efetuado o último revolvimento até a interrupção do processo, o qual ocorreu no dia 3 de Agosto.

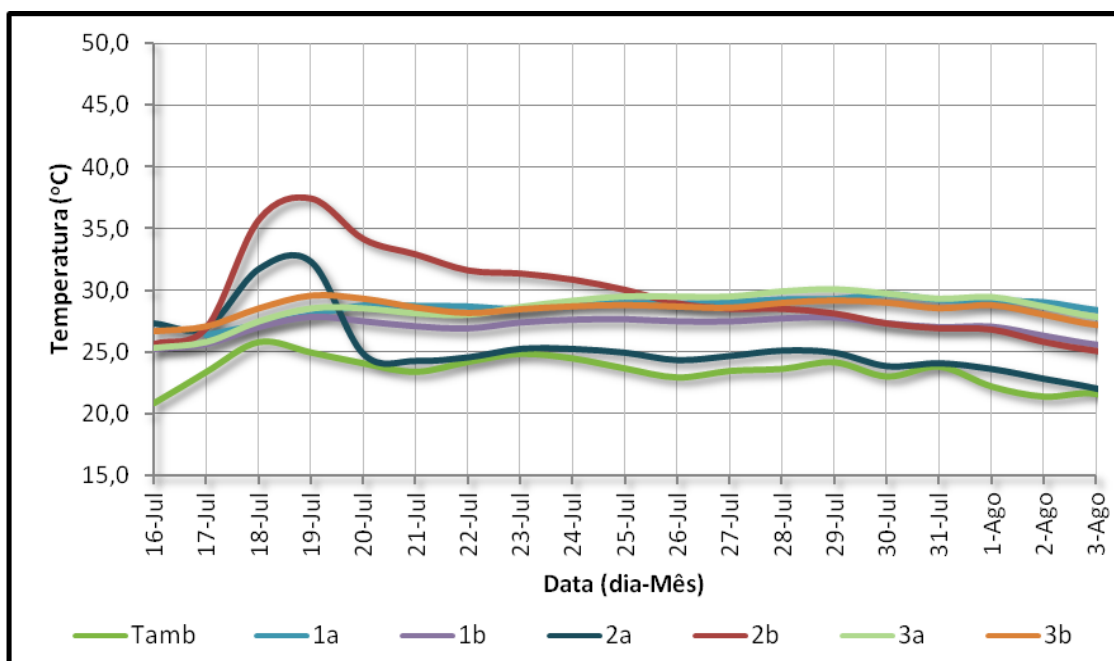


Figura 38 – Temperaturas medidas desde o último revolvimento (17 de Julho) até ao terceiro revolvimento (16 de Julho) no centro de cada pilha e temperatura ambiente (Tamb).

Após este último revolvimento, as temperaturas apresentadas em todas as pilhas mantiveram-se estabilizadas até dia 17 de Julho, em que começaram a subir as de todas as misturas. A temperatura das pilhas de mistura 1 e 3 subiram ligeiramente (cerca de 4 °C) apresentando a partir desse momento, temperaturas no intervalo entre 27,5 e 30 °C. Já nas pilhas de mistura 2, no dia 17, a temperatura começou a subir, atingindo 37 °C, no final do dia 19 de Julho na pilha 2b e 33,5 °C pela mesma altura na pilha 2a; nesta última, logo de seguida, ocorreu uma descida rápida para 24 °C (coincidente com a temperatura ambiente). A partir desse momento, na pilha 2a, a temperatura manteve-se muito próxima da temperatura ambiente, apresentando até oscilações semelhantes. Este acontecimento permitiu averiguar que a fase de degradação nesta pilha já se encontrava próximo do fim. Já na pilha 2b, apesar de também ter sido verificada uma descida da temperatura, esta manteve-se sempre cerca de 5 °C acima da temperatura 2a.

Pelo parâmetro acima analisado é possível dizer que foi a pilha 2a que chegou mais próximo do final do processo de compostagem, uma vez que parecia já ter atravessado a fase de degradação; no entanto, o período de maturação, que se segue a esta fase, não se

apresentava ainda concluído. A falta desta última fase vai ser referida e analisada juntamente com os restantes parâmetros, neste Capítulo.

Outra razão possível para a falha no aquecimento de uma pilha de composto é a mistura inicial ser estéril ou conter uma população microbiana reduzida. Se a população microbiana inicial for pequena, o tempo necessário para o respetivo desenvolvimento e crescimento vai ser superior. Este tipo de problemas não é contudo comum em resíduos como lamas de estações de tratamento de águas residuais<sup>[38]</sup>. A adição de material já ativo, como os resíduos de silagem, poderá possibilitar que estes funcionem como fontes de inoculante. Por outro lado, por mais poder inoculante que os resíduos apresentem, se a estrutura da mistura não for suficiente para a circulação de ar e consequente distribuição de oxigénio, o processo vai ter sempre dificuldade em se desenvolver, dada a demora na reprodução da flora microbiana.

O arejamento é a medida corretiva mais adequada para o parâmetro temperatura, quando este se encontra acima do valor desejado ou apresenta fenómenos inesperados<sup>[25]</sup>.

Tal como já foi referido no Capítulo 2, o arejamento através do revolvimento da pilha foi objeto de critérios previamente definidos, designadamente caso ocorressem temperaturas superiores a 55 °C ou a ocorrência de uma diminuição de temperatura inesperada. Uma vez que não chegaram a ser atingidas temperaturas muito elevadas, o motivo de revolvimento foi sempre a descida inesperada de temperatura.

No Anexo XII está disponível o gráfico da variação da temperatura durante todo o processo, no sentido de permitir uma visão geral dos acontecimentos.

### 3.1.2 Termografia

As Figuras 39 – 44 apresentam as imagens termográficas de quatro dias de processo de compostagem distintos, para cada uma das pilhas.

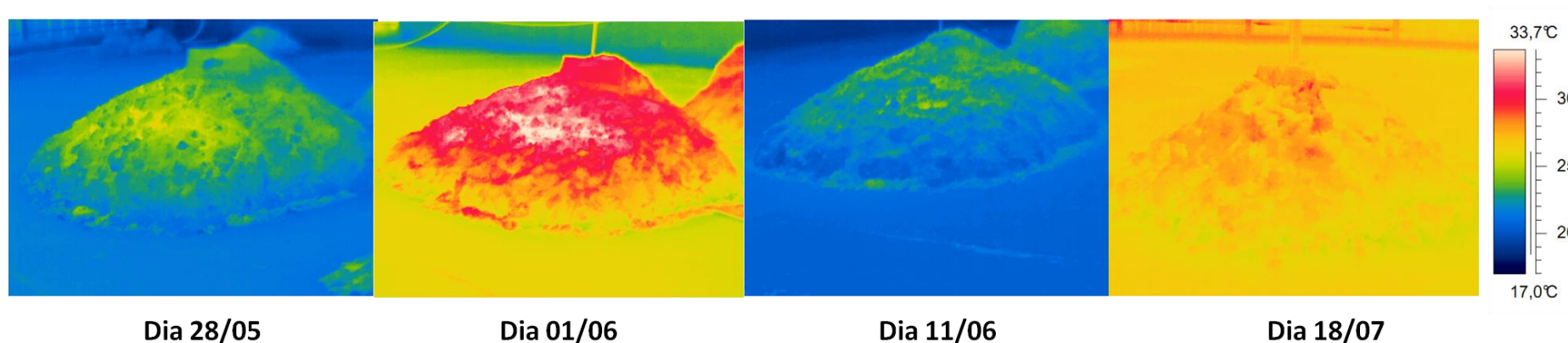


Figura 39 – Imagens termográficas de quatro dias de processo de compostagem distintos, da pilha 1a.

Observando a Figura 39, referente à réplica “a” da mistura 1, pode verificar-se que desde o dia 28/05 até 01/06, a área de maior temperatura é praticamente a mesma, o que permite verificar o referido anteriormente em relação à zona de maior transmissão de calor. Também é possível observar que com o achatamento consequente da mistura utilizada nestas pilhas (70 % lama e 30 % restantes resíduos) a área superficial aquecida é maior. Do dia 11/06 para o dia 18/07, o local de maior transmissão de calor mudou uma vez que foi efetuado um revolvimento, mudando o material de sítio. No dia 18/07, a temperatura da pilha era semelhante à temperatura ambiente, o que não permitiu, a esta escala, observar muito contraste.

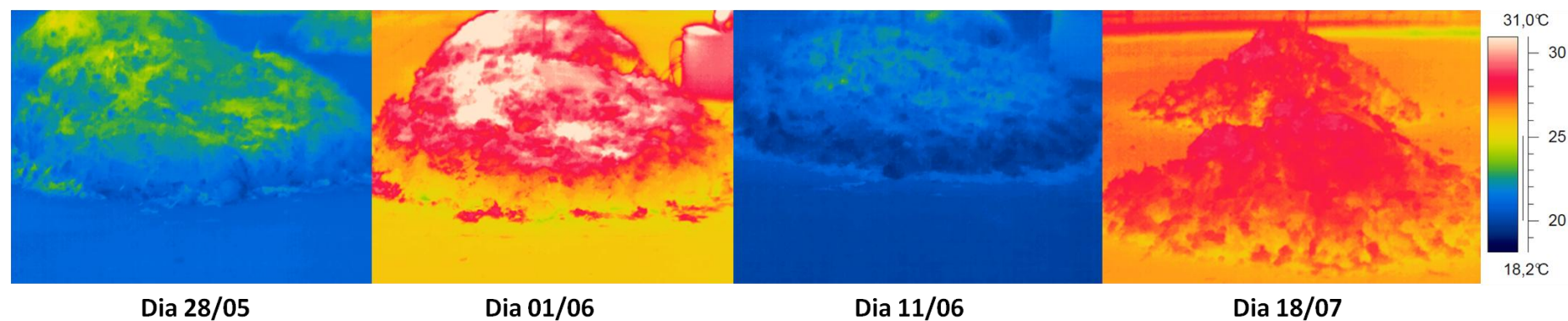


Figura 40 – Imagens termográficas de quatro dias de processo de compostagem distintos, da pilha 1b.

Já na Figura 40, onde está representada a imagem termográfica da pilha 1b, a situação é bastante semelhante à anterior.

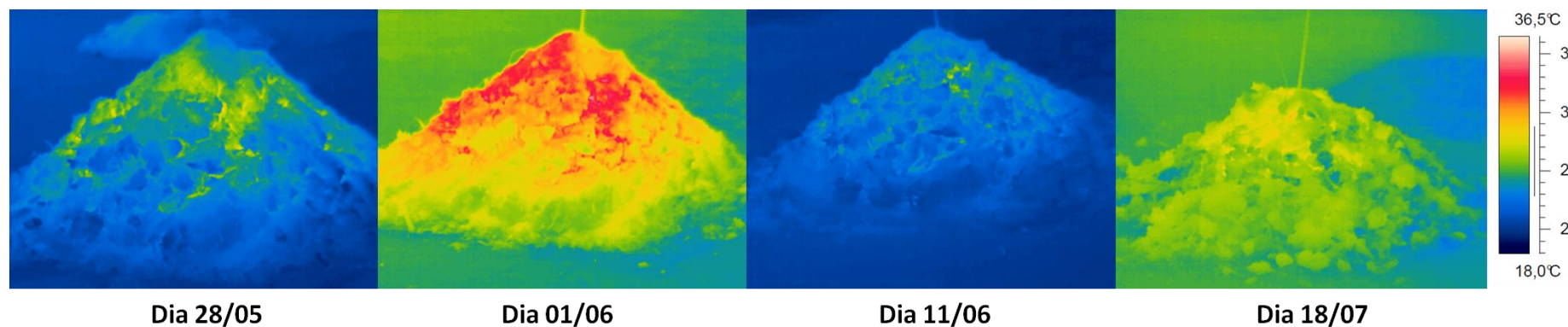


Figura 41 – Imagens termográficas de quatro dias de processo de compostagem distintos, da pilha 2a.

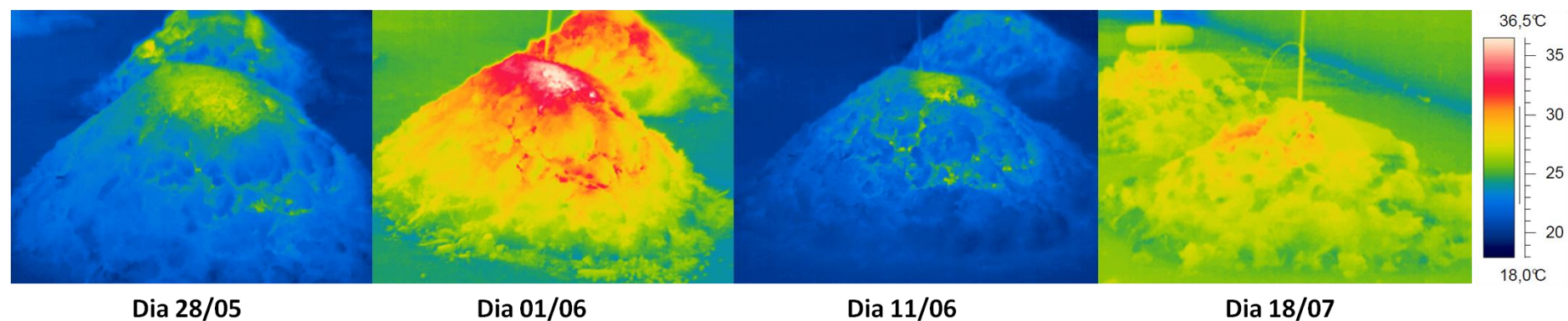


Figura 42 – Imagens termográficas de quatro dias de processo de compostagem distintos, da pilha 2b.

Nas imagens referentes às pilhas 2a e 2b, apresentadas na Figura 41 e 42, dada a sua estrutura mais sustentada pela quantidade de estilha de madeira adicionada (30%) que permitiu manter a altura com que foi construída, é possível observar que a área mais quente da superfície da pilha é bastante mais reduzida que a observada nas pilhas de mistura 1 (39 e 40). Assim, mais uma vez é possível constatar que quanto maior a altura da pilha, menor é a sua perda de calor pela superfície.



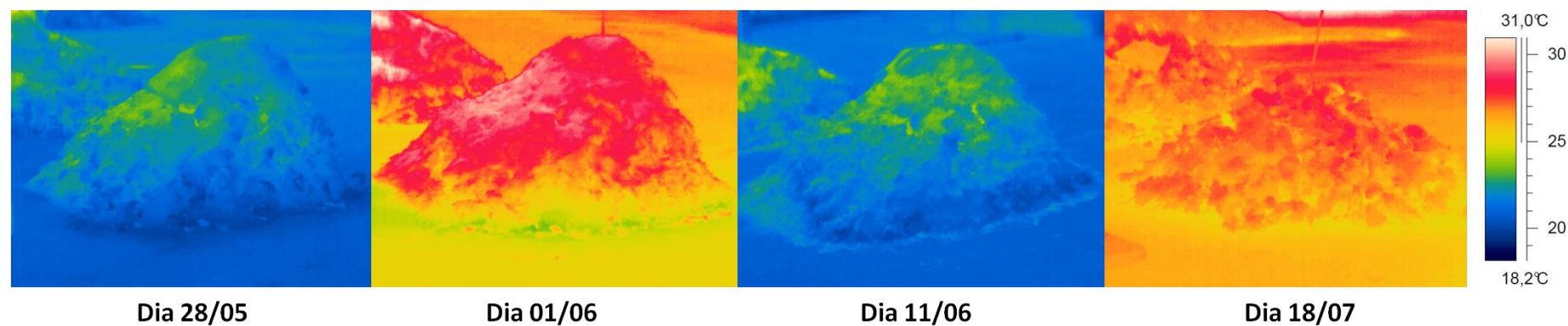


Figura 43 – Imagens termográficas de quatro dias de processo de compostagem distintos, da pilha 3a.

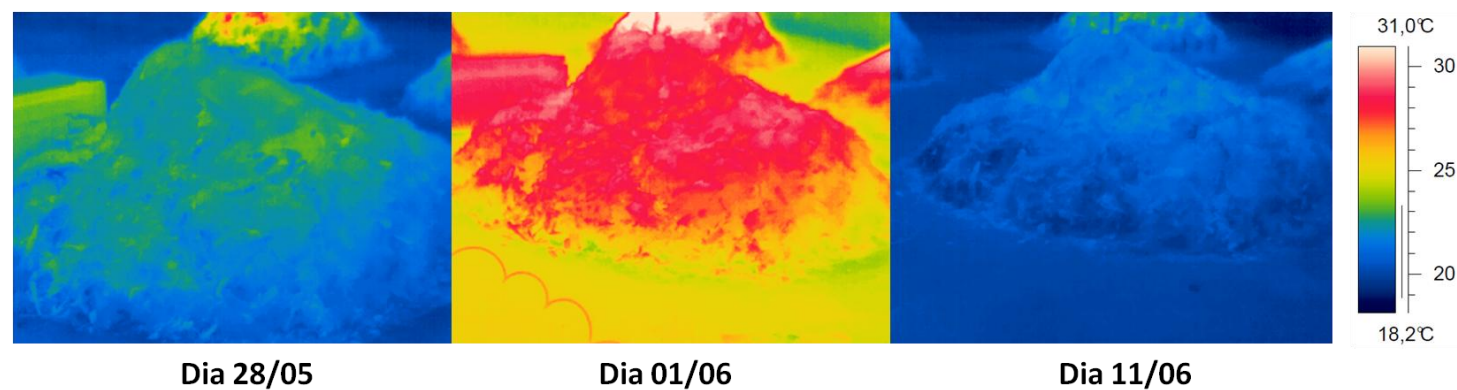


Figura 44 – Imagens termográficas de três dias de processo de compostagem distintos, da pilha 3b.

Finalmente, nas Figuras 43 e 44, referentes às pilhas de mistura 3a e 3b, respetivamente, constata-se que toda a superfície da pilha se encontra praticamente à mesma temperatura. O único fator que explica este acontecimento é a elevada estrutura que leva a uma porosidade que dissipa o calor interior por toda a massa. Pode ser um fenómeno vantajoso, uma vez que não é só o centro da pilha que atinge temperaturas altas mas, por outro lado, dificulta a subida da temperatura nesse local, reduzindo a velocidade a que o processo de compostagem se desenrola.

Pela observação das Figuras 39 – 44, é possível verificar que o aquecimento da superfície das pilhas acontece por uma zona específica, que vai variando de pilha para pilha, sendo mais normalmente no topo. Essa superfície está sobre uma zona de material onde é mais fácil a transmissão de calor. Nas pilhas que perderam alguma altura, tornando-se mais achatadas, esta superfície (onde são transmitidas as temperaturas mais elevadas provenientes do centro da pilha), ocupa uma área maior, levando ao seu maior arrefecimento por ter uma maior área de perda de calor para o exterior. Este é o motivo pelo qual é importante manter as pilhas de compostagem com uma altura minimamente considerável.

### 3.1.3 Humidade

Em relação à análise da humidade ao longo do processo, só foi possível fazer três medições. A primeira foi realizada cerca de um mês após o início do processo. A humidade da mistura inicial, indicada na Tabela 17, refere-se ao valor calculado com base na humidade dos vários resíduos constituintes.

**Tabela 17 – Valores da humidade nas pilhas de compostagem, medidos ao longo do processo.**

Amostra	Pilha	Humidade da mistura inicial	20-06-2012		02-07-2012		20-07-2012	
			Humidade média	Desvio Padrão	Humidade média	Desvio Padrão	Humidade média	Desvio Padrão
1 e 2	1a	64,6 %	69,5 %	0,8 %	60,0 %	3,9 %	-	-
3 e 4	1b		70,0 %	0,3 %	67,3 %	1,2 %	-	-
5 e 6	2a	55,6 %	58,6 %	4,9 %	50,9 %	6,6 %	36,6 %	0,3 %
7 e 8	2b		59,3 %	1,7 %	46,7 %	6,6 %	31,6 %	0,5 %
9 e 10	3a	53,6 %	57,8 %	2,2 %	54,0 %	3,5 %	-	-
11 e 12	3b		60,2 %	3,6 %	59,3 %	1,7 %	-	-



O resultado da humidade final da amostra relativa à pilha 2a, análise realizada pelo laboratório ISQ, foi de 26 %, sendo que esta perda de água se deve ao tempo extra de compostagem que essa amostra atravessou até à sua recolha (3 de Agosto) e que os valores apresentados para dia 20-07-2012 foram obtidos no dia seguinte à amostragem.

Note-se que as pequenas diferenças encontradas para o valor da humidade na mistura inicial e na primeira análise, devem-se, muito provavelmente, ao facto de uma resultar de uma estimativa tendo em conta a composição da mistura e o teor de água dos seus constituintes e outra ser uma medição analítica.

São, também, de analisar as diferenças entre o desvio padrão ao longo do processo. Inicialmente o desvio padrão não foi muito elevado uma vez que a humidade ainda era muito elevada e a pilha se encontrava muito homogénea, não tendo sofrido um incremento de temperatura suficientemente elevado para provocar instabilidade no composto. Na segunda medição, a amostra já tinha sofrido duas fases de aquecimento. Considera-se, por tal, que devido à heterogeneidade na pilha, nomeadamente perfil de temperaturas (tal como mostrado antes), as duas amostras retiradas podem ter estado em situações de temperatura bastante diferentes, que levaram a teores de água ligeiramente diferentes. Finalmente, à data da última medição, a pilha já se encontrava mais homogénea, consequência dos vários revolvimentos sofridos, estando o composto mais estabilizado e com baixo teor de humidade, o que se traduziu também num menor desvio padrão entre amostras.

Relativamente à variação entre réplicas da mesma mistura, ocorreram sempre algumas diferenças, verificando-se que a mistura 1 apresentou maior desvio percentual, provavelmente por ser a pilha com maior humidade e menor estrutura, o que dificultou a perda dessa humidade. Deste modo, basta que uma das réplicas apresente uma estrutura com direção ligeiramente mais favorável à perda de humidade que culmina numa diferença entre elas.

Assim, sendo o tradicional período de compostagem em pilha, segundo Brito, L. M.<sup>[36]</sup> de cerca de 3 meses, podendo ainda acrescer um período de 3 meses para maturação, e segundo a compilação de fichas técnicas sobre compostagem pela British Columbia Ministry of Agriculture and Food<sup>[43]</sup>, que sugere um período de fase ativa com 21 a 40 dias acrescido de uma fase de maturação de 30 dias, tendo sempre em conta a pequena dimensão da experiência que lhe confere a necessidade de maior tempo de processo, é possível perceber a falta de maturação do composto em estudo.

## 3.2 Qualidade do Composto – Resultados das análises e determinações efetuadas

Neste subcapítulo será realizada a comparação dos valores obtidos na análise com os limites referidos nas especificações técnicas. Estes limites já foram apresentados no subcapítulo 1.5.1.3 (Tabela 4). A comparação do número de revolvimentos efetuados nesta experiência com os obrigatórios para o período de higienização não foi realizada uma vez que este período não aconteceu.

### 3.2.1 Determinações Físicas

#### 3.2.1.1 Humidade

Tendo em conta as especificações técnicas, que determinam que a humidade do composto final deve ser inferior a 40 %<sup>[15]</sup>, pode verificar-se que o valor obtido nas análises, tanto do laboratório contratado (26 %) como das executadas nas instalações da empresa (36,6 % e 31,6 % para a pilha 2a e 2b respetivamente), se encontra abaixo desse valor.

#### 3.2.1.2 Granulometria

Na Tabela 18 é apresentada a massa de composto retida em cada peneiro, bem como as perdas de material ao longo da análise. Estas perdas nunca ultrapassaram 0,1 %.

Tabela 18 – Massa total da amostra analisada e das quantidades retidas em cada peneiro.

Amostra (Pilha)	Massa (g)	Abertura da malha (mm), massa retida (g)						Massa Final (g)	Perdas
		31,5	25	14	5	2	<2		
3 (2a)	103,2	0,0	0,0	6,0	33,6	25,7	37,8	103,1	0,1 %
4 (2a)	100,2	0,0	0,0	9,7	30,2	29,3	30,9	100,1	0,1 %
1 (2b)	100,2	0,0	0,0	7,6	24,1	30,9	37,5	100,1	0,1 %
2 (2b)	100,1	0,0	0,0	4,9	30,3	33,8	31,0	100,0	0,1 %

Analisando a Tabela 19 pode constatar-se que a granulometria do material não é perfeitamente homogênea. Verificou-se que todo o material apresentou granulometria

inferior a 25 mm, sendo que apenas uma pequena parte (entre 5 e 10 %, dependendo da amostra) apresenta granulometria superior a 14 mm e menor que 25 mm. Em todos os casos a granulometria inferior a 2 mm apresenta a maior expressão mas o material apresenta-se razoavelmente distribuído entre as 3 granulometrias (inferior a 2, entre 2 e 5 mm, e entre 5 e 14 mm).

**Tabela 19 – Percentagem de amostra retida em cada peneiro.**

Amostra	Abertura da malha (mm), massa retida (% m/m)					
	31,5	25	14	5	2	< 2
<b>2a</b>	0,0 %	0,0 %	27,1 %	31,4 %	27,1 %	33,8 %
<b>2b</b>	0,0 %	0,0 %	6,2 %	27,2 %	32,3 %	34,2 %

No que diz respeito ao material de maior granulometria (entre 14 e 25 mm), considera-se que deve ser feita uma operação de crivagem ou peneiração do material, assim como eventualmente uma subsequente recirculação deste material mais grosseiro no processo, uma vez que a maioria corresponde à estilha e casca utilizadas. Este método permitiria também tornar o composto mais homogéneo. Em termos de desvio percentual relativo, foi sempre inferior a 22 %, exceto na malha de abertura 14. Por outro lado, este desvio não influencia os resultados, uma vez que a única malha comparada com as especificações é a de 25 mm, que apresentou resultados iguais em todas as análises.

Em comparação com as especific, que definem que 99 % do material deverá passar por um crivo (de malha quadrada) com 25 mm de abertura, ambos os compostos em análise cumpriram este requisito, uma vez que 100 % dos materiais analisados passaram essa malha.

### **3.2.2 Análises Químicas**

#### **3.2.2.1 Matéria Orgânica**

A matéria orgânica representa a fonte de alimento para os microrganismos decompositores presentes<sup>[27]</sup>. Ao longo da sua decomposição, esta pode seguir vias metabólicas diferentes tais como a mineralização, a humificação e a degradação parcial (por respiração aeróbia, respiração anaeróbia e fermentação)<sup>[29]</sup>.

Se for realizada uma gestão adequada do processo, cerca de 50 % da matéria orgânica biodegradável é convertida em CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, sais minerais e energia. Já da restante matéria

orgânica cerca de 20 % sofre complexas transformações metabólicas, com produção final de substâncias húmicas e os restantes 30 % são parcialmente degradados por processos aeróbios e anaeróbios com a produção final de moléculas orgânicas menos complexas<sup>[29]</sup>.

Esta perda de matéria orgânica biodegradável durante o processo de compostagem pode variar de 30 a 60 %.

A percentagem de matéria orgânica obtida após a análise dos compostos revela alguma diferença entre o composto 2a e 2b, diferença que não se consegue observar com tanta nitidez na análise aos outros parâmetros. Assim, a amostra 2a não cumpre os requisitos mínimos exigidos, isto é, tem um teor de matéria orgânica inferior a 30 % reportada à matéria seca (valor mínimos exigido na legislação). Já a amostra 2b, apresenta teor em matéria orgânica adequado para um composto orgânico, uma vez que é superior a 30 %, tal como se pode constatar na Tabela 20.

**Tabela 20 – Valores da matéria orgânica da lama utilizada para a construção das pilhas, e das amostras de composto 2a e 2b.**

Amostra	Matéria Orgânica - Lama	Matéria Orgânica - Composto		
		Análise	S	Boletim
2a	62 %	25 %	6 %	26 %
2b		35 %	1 %	-

É também possível perceber (Tabela 20) que a perda de matéria orgânica no processo ocorreu da forma prevista, uma vez que na pilha 2a e 2b houve perda de 60 e 40 % de matéria orgânica, respetivamente.

O desvio observado relativamente ao limite legal de referência (30 %) pode dever-se ao facto de a mineralização e a humificação não terem sido completas, o que denota a falta de um período de maturação.

### 3.2.2.2 Metais Pesados

Os perigos ambientais da adição de materiais com concentrações altas de metais pesados no solo estão estritamente ligados à mobilidade destes elementos e, por isso, à sua concentração na fase líquida do solo. Deste modo, a distribuição de metais pesados entre a

fase sólida e a fase líquida do solo é considerada extremamente importante na avaliação das consequências desta adição <sup>[47]</sup>.

O controlo destes elementos no composto vai depender da utilização que lhe será dada, isto é, se o composto se destina à agricultura de alimentação animal ou humana, necessita de um elevado nível de controlo. Pelo contrário, compostos para utilização fora da cadeia alimentar, como a silvicultura, a recuperação mineira, etc. podem ter limites menos restritivos a este nível <sup>[44]</sup>.

Tendo em conta as especificações técnicas (Tabela 21), as concentrações de cádmio, chumbo, cobre, crómio, mercúrio e níquel encontram-se abaixo do limite máximo dos compostos orgânicos de Classe I. Por outro lado, a concentração de zinco no composto ultrapassa o limite máximo para a Classe I, passando a estar inserido na Classe II, fazendo com que o composto passe a ser classificado como Classe II. Os valores utilizados foram obtidos na análise química ao composto (método já descrito no Capítulo 2)

**Tabela 21 – Concentração de metais pesados nas amostras de composto analisadas e na lama utilizada como matéria-prima no processo.**

Elemento	Unidade	Lama	21/07/2012				Composto - Boletim
			2a	s	2b	s	
<b>Cádmio</b>	mg Cd.kg <sup>-1</sup> de matéria seca	<20*	0	7	0	10	<0,33*
<b>Chumbo</b>	mg Pb.kg <sup>-1</sup> de matéria seca	<80*	17	0	17	0	<17*
<b>Cobre</b>	mg Cu.kg <sup>-1</sup> de matéria seca	142	70	10	77	10	32
<b>Crómio</b>	mg Cr.kg <sup>-1</sup> de matéria seca	<100*	LQ	17	50	20	<17
<b>Mercúrio</b>	mg Hg.kg <sup>-1</sup> de matéria seca	<10*	0,0002	4,837X10 <sup>-5</sup>	0,0002	5,609 X10 <sup>-5</sup>	<0,33*
<b>Níquel</b>	mg Ni.kg <sup>-1</sup> de matéria seca	<100	LQ	20	30	20	<10*
<b>Zinco</b>	mg Zn.kg <sup>-1</sup> de matéria seca	340	203	10	227	10	94

\*Limite de quantificação do equipamento de medição; LQ – limite de quantificação.

### 3.2.2.3 Micropoluentes orgânicos

#### a. Bifenilos policlorados (PCBs)

Segundo Fischer e Glaser <sup>[99]</sup>, que citam a experiência realizada por AmLinger *et al.* <sup>[100]</sup>, durante o processo de compostagem só são degradados cerca de 45 % dos PCB presentes.

O valor inicial dos PCB nas lamas foi de  $<0,13 \text{ mg.kg}^{-1}$  (matéria seca). Após o decorrer do processo de compostagem, este valor diminuiu para cerca de 0,0009 e 0,0046  $\text{mg.kg}^{-1}$  (matéria seca) na amostra da pilha 2b, sendo que na pilha 2a o valor se encontrava abaixo do limite de deteção de 0,0001  $\text{mg.kg}^{-1}$  (matéria seca).

Quando comparado com as especificações técnicas, ambos os valores se encontram muito abaixo do limite estabelecido de 0,8  $\text{mg. kg}^{-1}$  (matéria seca).

#### **b. Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (HAP)**

Segundo Hafidi *et al.* <sup>[101]</sup>, a biodegradação, a humificação e a adsorção constituem os processos mais influentes no destino ou na biodisponibilidade dos HAP presentes no material a ser compostado que conduz à produção segura e estável de composto final.

Através da análise das lamas utilizadas (único componente da mistura com possibilidade de presença destes compostos), estas apresentam valores inferiores a 0,39  $\text{mg.kg}^{-1}$  (matéria seca). Após o decorrer do processo de compostagem, este valor diminuiu para cerca de 0,2984 e 0,2359  $\text{mg.kg}^{-1}$  (matéria seca) na amostra relativa à pilha 2a (23,5 e 39,5 %, respetivamente) e cerca de 0,0456 e 0,3876  $\text{mg.kg}^{-1}$  (matéria seca) na amostra relativa à pilha 2b (88,3 % e 0,6 %, respetivamente).

Comparando as concentrações obtidas através da análise a estes compostos com os valores indicados nas especificações técnicas, ambos os valores se encontram abaixo do limite estabelecido de 6  $\text{mg. kg}^{-1}$  (matéria seca). Contudo, há uma discrepância nos valores medidos nas amostras retiradas na pilha b relativa à segunda mistura efetuada, que conta com 50 % de cada uma das parcelas de resíduos lama/restantes resíduos, o que pode ser sinónimo de alguma heterogeneidade do material na pilha de compostagem.

### 3.2.2.4 Composição Química

A Tabela 22 apresenta a composição química ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) das amostras retiradas dia 20 de Junho de 2012, no sentido de possibilitar a análise das variações de composição ao longo do processo (boletins de exemplo apresentados no Anexo XIII).

**Tabela 22 – Composição química das amostras retiradas dia 20 de Junho de 2012 da respetiva pilha de compostagem.**

20 de Junho												
Pilha	1a		1b		2a		2b		3a		3b	
	$\text{mg kg}^{-1}$	erro	$\text{mg kg}^{-1}$	erro	$\text{mg kg}^{-1}$	erro	$\text{mg kg}^{-1}$	erro	$\text{mg kg}^{-1}$	erro	$\text{mg kg}^{-1}$	erro
<b>Molibdénio</b>	20	0	10	0	10	0	10	0	10	0	20	0
<b>Zircónio</b>	150	0	190	0	80	0	200	0	160	0	80	0
<b>Estrôncio</b>	130	0	130	0	140	0	140	0	110	0	80	0
<b>Urânio</b>	10	0	10	0	10	0	10	0	10	0	10	0
<b>Rubídio</b>	110	0	90	0	50	0	110	0	100	0	60	0
<b>Tório</b>	20	0	10	0	0	0	20	0	20	0	10	0
<b>Arsénio</b>	20	0	20	0	10	0	10	0	30	0	20	0
<b>Ferro</b>	12870	90	10250	80	5740	60	11520	80	11200	80	10800	80
<b>Manganês</b>	470	30	620	30	630	30	630	30	290	20	320	20
<b>Titânio</b>	2530	50	2070	60	1310	40	2470	50	2690	50	2160	50
<b>Escândio</b>	140	50	140	70	230	70	100	50	70	40	90	50
<b>Cálcio</b>	46560	240	62970	350	98130	340	63790	250	32710	200	43100	230
<b>Potássio</b>	31360	260	29760	320	26800	250	32560	250	27140	240	21210	220
<b>Enxofre</b>	6450	250	4790	210	6340	260	6710	330	6700	250	8060	270

Dentro dos elementos referidos na Tabela 22, os que apresentam valores mais elevados são o ferro, o cálcio, o potássio e o enxofre. Apesar de não existirem limitações legais para a aplicação de compostos com limites expostos para este tipo de constituintes, é importante ter em conta o seu efeito nas plantações.

O cálcio é absorvido pelas plantas na forma de  $\text{Ca}^{2+}$ , sendo-lhes indispensável porque, para além de outras funções ligadas ao seu metabolismo, tem um papel determinante na estabilidade das membranas celulares. O comportamento do cálcio no solo apresenta algumas semelhanças com o comportamento do potássio. Este elemento deposita-se nas paredes celulares dos vegetais provocando o seu enrijecimento, quando existente em excesso<sup>[102]</sup>. O seu elevado teor nas amostras de composto final deve-se não só à elevada quantidade de cálcio na lama utilizada mas também à utilização de cinza.

Já o potássio não entra na composição de qualquer composto vital da planta. No entanto, desempenha importantes funções no metabolismo vegetal, em particular no que se refere à síntese dos glícidos e das proteínas, ativação de enzimas, relações hídricas da planta, melhoria de diversos aspetos da qualidade dos produtos, etc.<sup>[102]</sup>. É também importante para a fase de floração das plantas, como no caso do tomate, para o crescimento das suas flores.

O elemento ferro é mais um elemento essencial, sendo que, a sua escassez nas plantas leva a que apresentem menor crescimento e clorose entre as nervuras das folhas mais jovens, isto é, como as suas folhas não produzem suficiente clorofila, passam a apresentar uma coloração verde pálido ou amarelado<sup>[103]</sup>.

O enxofre é um dos constituintes de certas substâncias vitais da planta, nomeadamente dos aminoácidos sulfurados (cisteína e metionina) e de certas enzimas. Apresenta-se como um elemento essencial para as plantas sendo mesmo exigido em quantidades bastante elevadas por algumas, em particular as crucíferas e diversas leguminosas<sup>[102]</sup>.

A Tabela 23 apresenta a composição química das amostras analisada a dia 21 de Julho de 2012, retiradas da respetiva pilha a dia 18 de Julho do mesmo ano.

A partir desta análise, e uma vez que esta é uma característica importante de uma substância corretiva de solos, pode perceber-se qual a constituição nutricional presente. A análise só foi realizada às duas pilhas com melhores resultados (pilhas com mistura 2).



Tabela 23 – Composição química das amostras analisadas a dia 21 de Julho de 2012.

21 de Julho												
Pilha	2a		2a		2a		2b		2b		2b	
	mg kg <sup>-1</sup>	erro	mg kg <sup>-1</sup>	erro	mg kg <sup>-1</sup>	erro	mg kg <sup>-1</sup>	erro	mg kg <sup>-1</sup>	erro	mg kg <sup>-1</sup>	erro
Molibdénio	10	0,000	0	0,000	0	0,000	10	0	10	0	0	0
Zircónio	250	0,000	220	0,000	260	0,000	290	0	220	0	220	0
Estrôncio	340	0,000	340	0,000	340	0,000	470	0	440	0	430	0
Urânio	LQ	0,001	LQ	0,001	LQ	0,001	LQ	10	LQ	10	LQ	10
Rubídio	120	0,000	130	0,000	120	0,000	80	0	80	0	80	0
Tório	20	0,000	10	0,000	20	0,000	10	0	10	0	10	0
Arsénio	20	0,000	20	0,000	20	0,000	10	0	10	0	20	0
Ferro	11290	0,009	11370	0,009	11230	0,009	10010	90	9560	80	9960	90
Manganês	1640	0,005	1630	0,005	1620	0,004	2330	60	2200	50	2170	50
Titânio	2030	0,005	2170	0,005	1940	0,005	1860	50	1500	40	1650	50
Escândio	LQ	0,011	LQ	0,011	LQ	0,011	LQ	140	LQ	140	LQ	140
Cálcio	122130	0,037	118700	0,038	121750	0,038	176880	470	186090	470	183460	480
Potássio	33940	0,028	33730	0,028	34700	0,029	31980	290	32330	280	31400	280
Enxofre	3050	0,022	3170	0,023	2870	0,022	3400	250	3380	250	3690	260

LQ – Limite de Qualificação

Pode agora avaliar-se a variação de alguns elementos ao longo do processo. Assim, na pilha 2a o ferro apresentou um crescimento pouco acentuado (comparando os valores da Tabela 22 com os da Tabela 23), sendo que as quantidades apresentadas são praticamente iguais. Já para a pilha 2b, o valor da concentração de ferro cresce para cerca do dobro.

Por outro lado, o cálcio apresenta um padrão de concentração bastante mais elevado, sendo que praticamente duplica a sua concentração, tanto na amostra 2a como na 2b. Este aumento pode ser devido à concentração dos elementos no composto devido à diminuição de volume do material. O valor do potássio concentrou-se um pouco com o decorrer do processo, ao contrário do enxofre, que foi o único elemento que reduziu de concentração ao longo do processo.

Na Tabela 24 estão expostos os resultados das análises a três amostras da cinza empregue como cobertura das pilhas de compostagem.

**Tabela 24 – Composição química da cinza, analisada dia 21 de Julho de 2012.**

<b>Cinza</b>						
	<b>1</b>		<b>2</b>		<b>3</b>	
	mg.kg <sup>-1</sup>	erro	mg.kg <sup>-1</sup>	erro	mg.kg <sup>-1</sup>	erro
<b>Molibdénio</b>	10	0	10	0	10	0
<b>Zircónio</b>	160	0	140	0	120	0
<b>Estrôncio</b>	820	10	840	10	810	10
<b>Urânio</b>	LQ	10	LQ	10	LQ	10
<b>Rubídio</b>	140	0	140	0	140	0
<b>Tório</b>	10	0	10	0	0	0
<b>Chumbo</b>	30	0	30	0	30	0
<b>Arsénio</b>	20	0	10	0	10	0
<b>Zinco</b>	100	10	100	10	100	10
<b>Cobre</b>	50	10	50	10	50	10
<b>Ferro</b>	8510	90	8850	90	8620	90
<b>Manganês</b>	4050	80	4180	80	4010	80
<b>Crómio</b>	LQ	20	LQ	20	LQ	20
<b>Titânio</b>	920	40	970	40	1030	40
<b>Escândio</b>	LQ	180	LQ	180	LQ	170
<b>Cálcio</b>	258350	590	259630	580	255690	580
<b>Potássio</b>	49840	370	50190	370	51170	370
<b>Enxofre</b>	6060	330	5700	320	5850	320

LQ – Limite de Qualificação

Permite, então, apurar que as elevadas concentrações de cálcio se devem não só às elevadas concentrações já presentes na lama, de 120 000 mg.kg<sup>-1</sup> e à concentração por

diminuição de volume, mas também à concentração deste elemento existente nas cinzas aplicadas como cobertura.

### 3.2.2.5 pH

Como se pode observar pelas medições do valor de pH (Tabela 25) nas várias amostras, correspondentes às pilhas 2a e 2b, mais uma vez é possível constatar que a pilha 2a estava ligeiramente atrasada no processo de compostagem relativamente à pilha 2b. Assim, na pilha 2a o pH médio foi 6,91, e na 2b foi de 7,23. A falta de um período de maturação do material é uma das condições que mais influencia a obtenção de valores de pH ligeiramente abaixo da neutralidade. Em termos normativos, é apenas referido que o pH do composto final deve encontrar-se entre 5,5 e 8,5.

**Tabela 25 – Valores de pH medido em amostras retiradas ao longo do processo de compostagem.**

	<b>Amostra</b>	<b>Pilha</b>	<b>T (°C)</b>	<b>pH<sub>1</sub></b>	<b>pH<sub>2</sub></b>	<b>pH<sub>3</sub></b>	<b>pH médio</b>
20 de Junho	7	2a	25,4	5,58	5,57	5,57	5,57
	8	2b	25,8	5,62	5,61	5,62	5,62
18 de Julho	1	2a	26,1	6,79	6,79	6,81	6,80
	2	2a	25,9	7,02	7,03	7,05	7,03
	3	2a	25,8	6,87	6,9	6,94	6,90
	4	2b	25,6	7,24	7,26	7,27	7,26
	5	2b	25,5	7,24	7,25	7,25	7,25
	6	2b	25,4	7,17	7,18	7,18	7,18
7 de Agosto	-	2a	22,6	8,3			

Relativamente aos valores obtidos no dia 20 de Junho, 18 dias após a construção da respetiva pilha de compostagem, estes apresentam resultados semelhantes entre as duas pilhas, o que permite verificar que estariam na mesma fase do processo de compostagem.

Tendo em conta que o pH da lama utilizada apresentava o valor 9,0, tal como era de esperar, verificou-se uma descida inicial do valor de pH, seguido de uma subida dos mesmo até estabilizar, no final do processo.

No dia 7 de Agosto, data em que a amostra foi enviada para laboratório externo (ISQ), o pH já tinha atingido 8,3.

Os valores baixos de pH são indicativos de falta de maturação, tal como seria de esperar, tendo em conta o período de duração do processo.

### 3.2.3 Análises Microbiológicas – *Escherichia Coli*

Na Tabela 26 são apresentados os valores obtidos após as análises microbiológicas realizadas.

Tabela 26 – Quantidades de E. Coli medida nas amostras de composto orgânico analisadas.

	Massa (g) (36,6% de humidade)	Massa seca	UFC	UFC/g	<i>Escherichia Coli</i> (UFC/g)
2a	10,00	6,34	6900	1088,3	1125,2
	10,05	6,37	5600	878,9	
	10,08	6,39	9000	1408,3	
2b	10,01	6,35	13900	2190,2	3910,8
	10,01	6,35	49000	7721,0	

O desvio padrão apresentado para pilha 2a foi de 266,6, que representa 24 % de variação. Já para a réplica b, os resultados foram inesperados, apresentando um desvio percentual de valores de 112 %. Contudo, a obtenção de uma maior quantidade de *Escherichia Coli* nesta réplica já era esperada uma vez que não foram atingidas temperaturas tão altas. Tendo em conta as especificações e comparando ambos os resultados obtidos com as 1000 UFC/g, este parâmetro é superior ao limite, particularmente no caso da réplica b, pelo que a qualidade ao composto não é atingida neste parâmetro. Tal facto deve-se, provavelmente, à dimensão das experiências, uma vez que a mesma não permitiu que fossem atingidos valores de temperatura muito elevados (máximo de 50 °C durante uns minutos na pilha 2a), não tendo ocorrido a higienização do composto. Tal como já foi referido, para promover a morte da E. Coli, é necessária a manutenção da temperatura acima de 55 °C durante pelo menos uma hora. Ainda assim, o facto de a pilha 2a ter atingido os 50 °C já permitiu uma aproximação ao cumprimento da legislação.

### 3.2.4 Análises Fitotoxicidade

Nas análises de fitotoxicidade, tal como já foi referido, foi realizada a medição da dimensão da maior folha e a contagem do número de folhas de 3 em 3 dias (Figura 45).

A constituição do material utilizado em cada vaso foi descrita na Tabela 16 no Capítulo 2 – *Materiais e Métodos*.

Constata-se, pela análise da Figura 45, que o crescimento das alfaces aconteceu a velocidades diferentes.

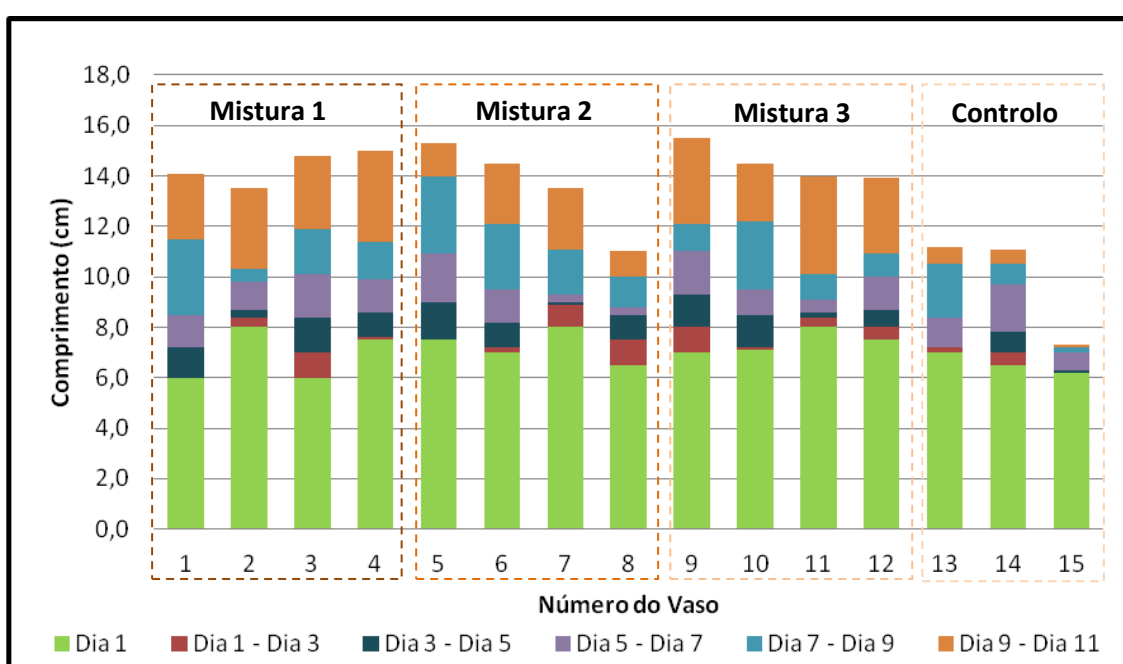


Figura 45 – Comprimento da maior folha de cada vaso.

No caso da mistura 1 (mistura equitativa de terra, turfa e composto), a pilha 2b, ao contrário do esperado, foi a que apresentou maior taxa de crescimento – Vasos 3 e 4, razões para tal não conseguiram ser apuradas pelos resultados obtidos.

No caso da mistura 2, (60 % de terra, 10 % turfa e 30 % composto), o composto da pilha 2a foi o que promoveu um maior crescimento desta planta - Vasos 5 e 6.

Também na utilização da mistura 3 (30 % terra, 10 % turfa, 60 % composto) se observou parecer mais vantajosa a utilização do composto proveniente da pilha 2a – Vasos 9 e 10.

Ao contrário do esperado, o crescimento das plantas do vaso 13, constituído unicamente por terra e do vaso 14, constituído por 1/3 de turfa e 2/3 de terra, foi sensivelmente igual, apesar de os momentos de crescimento terem sido diferentes, isto é, os dias em que se observou maior intensidade de crescimento no vaso 13 foram diferentes dos dias de maior intensidade de crescimento no vaso 14. O facto de este resultado não ser o esperado prende-se com a ideia de a turfa beneficiar o processo de crescimento, verificando-se deste modo que este benefício pode só acontecer em algumas das fases de crescimento.

Por outro lado, tal como esperado, o crescimento das alfaces colocadas nos vasos com alguma percentagem de composto, foi sempre superior ao crescimento das alfaces colocadas nos vasos 13 e 14, de controlo.

O vaso 15, unicamente constituído por composto da pilha 2 apresentou muito pouco crescimento, provando que o composto não contém todos os fatores *per si* (nutrientes, estrutura, etc.) para comportar e promover o crescimento de plantas.

A contabilização do número de folhas em cada vaso permitiu confirmar a existência de diferenças entre os resultados do crescimento da alface nas várias misturas (Figura 46).

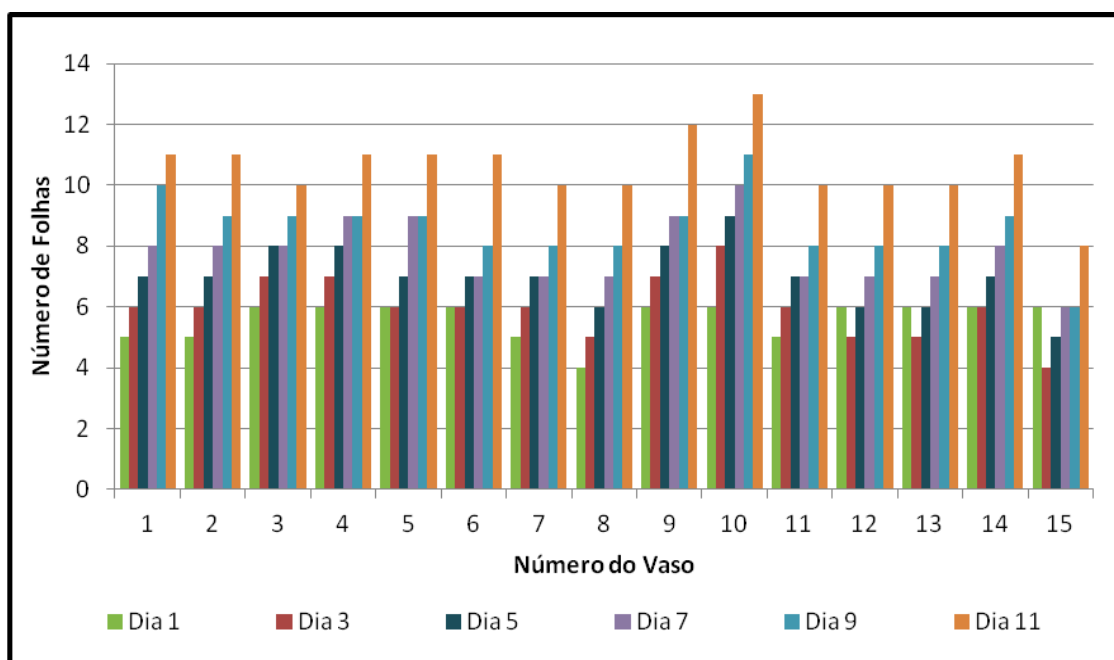


Figura 46 – Número de folhas de alface em cada vaso

As únicas conclusões não coincidentes com as formuladas através da medição do comprimentos das folhas são que o composto 2a mostrou-se sempre mais ou tão benéfico do que o composto 2b e que a utilização da turfa no vaso 14 foi favorável ao crescimento das plantas.

Deste modo, mais uma vez, a mistura com maior quantidade de composto 2a mostrou ser a mais favorável para o crescimento da alface.

Finalmente é também importante referir que não ocorreu fitotoxicidade na utilização de nenhuma das misturas com composto na sua constituição. Por outro lado, o composto sozinho pode não ser suficiente para promover um crescimento eficiente da alface.

Uma vez que o crescimento da alface no controlo com 2/3 de Terra e 1/3 de Turfa foi inferior ao observado nas alfaces plantadas nas misturas Composto/Terra/Turfa, pode concluir-se que estas substâncias têm um efeito sinérgico para o crescimento das alfaces, mostrando-se em todos os casos vantajosa a adição de composto.

Nas Figuras 47 e 48 é apresentado o crescimento das alfaces de dois dos vasos, vaso 9 – alface que apresentou maior crescimento – e vaso 15 – alface que apresentou menor crescimento. As representações fotográficas das alfaces dos restantes vasos são apresentadas no Anexo XIV.

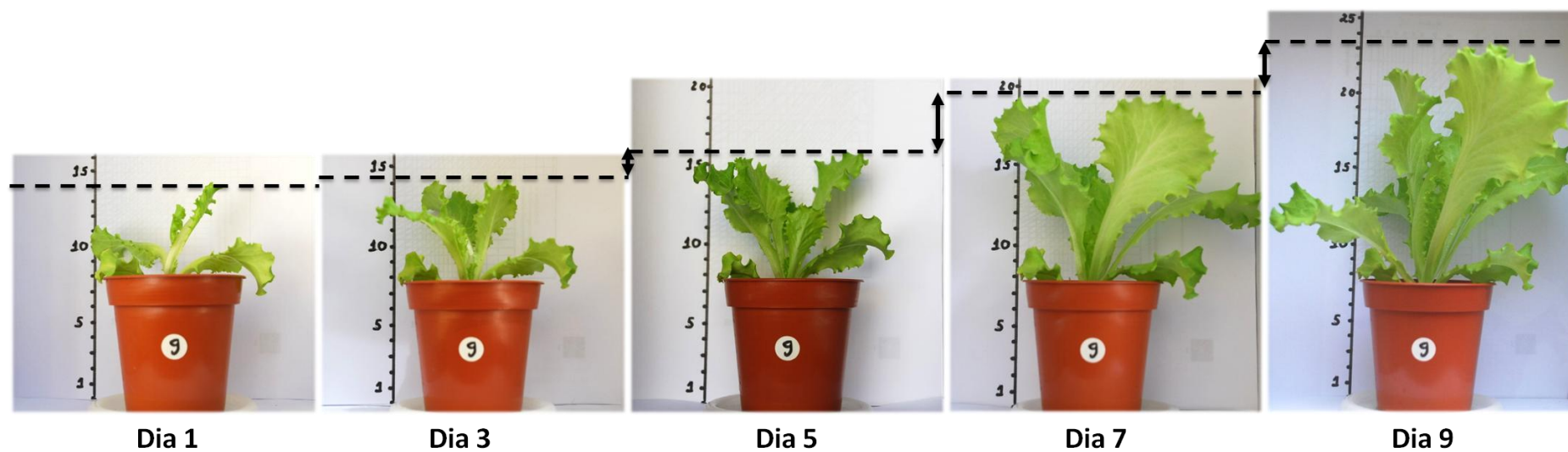


Figura 47 – Reportagem fotográfica do vaso 9 (vaso com maior crescimento).

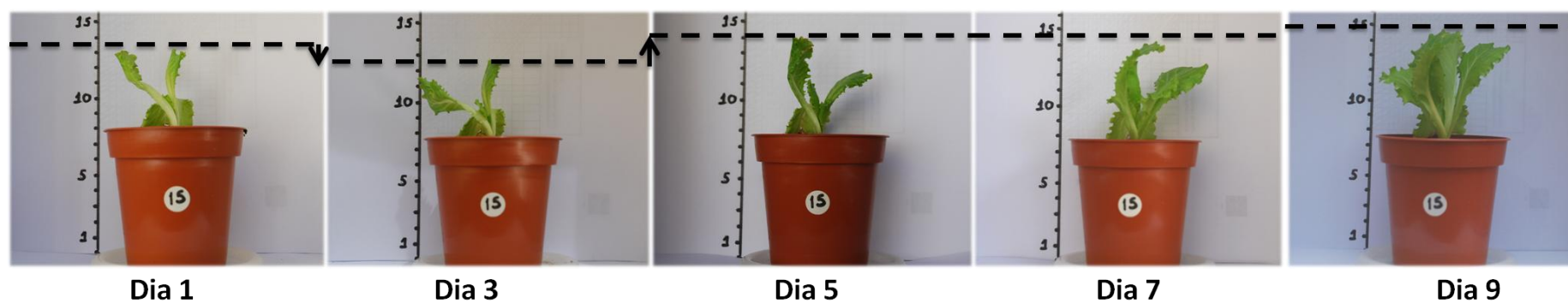


Figura 48 – Reportagem fotográfica do vaso 15 (vaso com menor crescimento).



Na Figura 49 está reportado o crescimento da alface do vaso 14, realizado para controlo e comparação com os restantes. Assim, é possível perceber que o composto favorece o crescimento da alface.

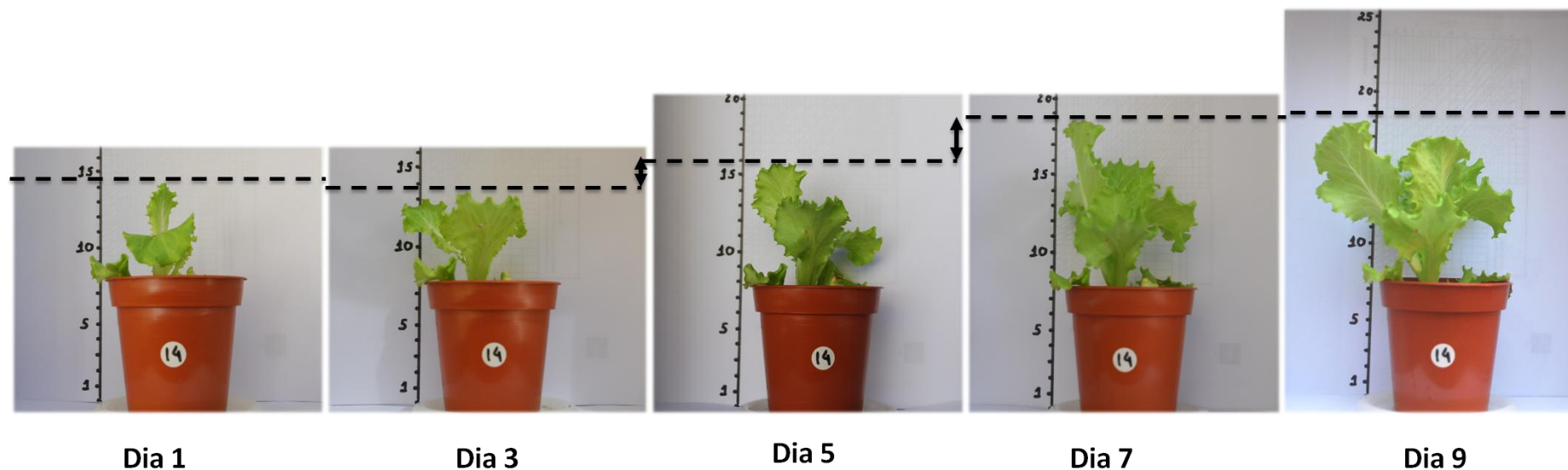


Figura 49 – Reportagem fotográfica do vaso 14 (vaso com 2/3 de Terra e 1/3 de Turfa - Controlo).

Em jeito de resumo, e para permitir uma visão global dos resultados obtidos e das conclusões às quais permitiram chegar, segue-se a Tabela 27.

**Tabela 27 – Resumo de todos os resultados obtidos comparáveis com as especificações técnicas (as células a vermelho representam os valores fora de todas as classes).**

Parâmetro	Valores Limite				Mistura 2	
	Classe I	Classe II	Classe II A	Classe III	a	b
<b>Cádmio (Cd)</b> mg.kg <sup>-1</sup> (matéria seca)	0,7	1,5	3,0	5,0	0	0
<b>Chumbo (Pb)</b> mg.kg <sup>-1</sup> (matéria seca)	100	150	300	500	17	17
<b>Cobre (Cu)</b> mg.kg <sup>-1</sup> (matéria seca)	100	200	400	600	70	77
<b>Crómio (Cr)</b> mg.kg <sup>-1</sup> (matéria seca)	100	150	300	400	<LQ	50
<b>Mercúrio (Hg)</b> mg.kg <sup>-1</sup> (matéria seca)	0,7	1,5	3,0	5,0	0,0002	0,0002
<b>Níquel (Ni)</b> mg.kg <sup>-1</sup> (matéria seca)	50	100	200	200	LQ	30
<b>Zinco (Zn)</b> mg.kg <sup>-1</sup> (matéria seca)	200	500	1000	1500	203	227
<b>Escherichia coli</b> (NMP/g)	1000	1000	1000	1000	1125,2	3910,8
<b>Teor de Humidade (%)</b>	Inferior a 40%				36,6	31,6
<b>Granulometria</b>	99 % do material deverá passar por um crivo de malha quadrada de 25 mm				100 % do material passa	100 % do material passa
<b>Matéria orgânica (%)</b>	> 30 % (reportado ao peso seco)				25	35
<b>pH</b>	Entre 5,5 e 8,5				6,91	7,23
<b>PCB</b> mg.kg <sup>-1</sup> (matéria seca)	0,8				<0,0001	0,00275
<b>HAP</b> mg.kg <sup>-1</sup> (matéria seca)	6				0,26715	0,2166

\*Incluem vidro, metais e plásticos, cujas partículas apresentem uma granulometria superior a 2 mm.

Assim, é possível concluir que, apesar de a maioria dos parâmetros limitados pelas especificações técnicas caberem na Classe I de compostos orgânicos, a aplicação deste composto na agricultura não seria autorizada uma vez que apresentam valores microbiológicos elevados e baixo teor de matéria orgânica.

## 4 CONCLUSÃO

A transformação dos produtos normalmente existentes em suspensão nas águas residuais afluentes a uma estação de tratamento de águas residuais, realizada maioritariamente pelos microrganismos atuantes no processo de tratamento, dá origem a um resíduo inevitável, denominado lama. Este subproduto é descrito como um material com teores de humidade elevados, bem como por apresentar quantidades apreciáveis de matéria orgânica, nutrientes (azoto, fósforo e potássio) e microrganismos patogénicos. Adicionalmente, os metais pesados (micropoluentes inorgânicos) podem também ser encontrados neste resíduo.

A sua denominação depende da origem das águas cujo processo de tratamento lhes dá origem. Assim, são lamas “urbanas” quando provenientes de um efluente urbano e “industriais” quando derivadas do tratamento de efluentes industriais. A composição das lamas também varia, naturalmente, consoante o efluente que lhe dá origem.

Na presente dissertação foram formuladas três misturas, com base em alguns parâmetros dos resíduos orgânicos incluídos nelas. Estes resíduos foram divididos em duas parcelas: lama e restantes resíduos, nesta última havendo estilha de madeira, ração de alimentação animal, silagem de milho e cinza. A primeira mistura formulada contou com 70 % de lama de uma ETAR, 18 % de estilha de madeira, 3 % de ração de alimentação animal, 6 % de silagem de milho e 3 % de cinza para cobertura. A segunda mistura foi constituída por 50 % de lama, 30 % de estilha de madeira, 5 % de ração de alimentação animal, 10 % de silagem de milho e 5 % de cinza também para cobertura. Finalmente, na terceira mistura utilizaram-se 50 % de lama, 47,5 % de estilha de madeira e 2,5 % de cinza para cobertura. Para cada uma destas misturas foram construídas duas pilhas de compostagem (réplicas “a” e “b”).

Na primeira fase, precedente ao primeiro revolvimento, foi possível observar uma subida da temperatura em todas as pilhas de compostagem, mais ou menos acentuada consoante a mistura de materiais. As pilhas constituídas pela mistura 2 (50 % de lama e 50 % de restantes resíduos) apresentaram o melhor comportamento em termos de degradação e desinfeção, pois nestas foi possível atingir as temperaturas mais elevadas. Foi possível concluir pelo observado com esta mistura, tendo em consideração o seu teor de silagem, que esta funciona como inoculante no desenvolvimento inicial da flora microbiana e consequentemente no aquecimento da pilha, favorecendo o processo. Comparando as pilhas com maior teor de silagem e com maior teor de estruturante (mistura 2 e 3) verificou-se que o material inoculante tem maior impacto do que o estruturante, uma vez que as

pilhas com melhor estrutura não parecem evidenciar crescimento da flora microbiana inicial tão rápido.

A utilização da termografia permitiu analisar o aquecimento na superfície das pilhas, que variou de pilha para pilha, concentrado essencialmente no topo. Nas pilhas que perderam alguma altura, tornando-se mais achatadas, esta superfície (onde são transmitidas as temperaturas mais elevadas provenientes do centro da pilha), ocupou uma área maior da pilha, levando ao seu arrefecimento por ter uma maior área de perda de calor para o exterior. Este é o motivo pelo qual se verificou que a dimensão estudada (pilhas com  $1,14 \text{ m}^3$ ) poderá ser uma limitação, pelo que é importante manter as pilhas de compostagem com uma altura minimamente considerável. Outra das limitações que se verificou estar associada à dimensão das pilhas foi a dificuldade em atingir temperaturas suficientemente elevadas, sendo que, à escala utilizada, não foi possível atingir temperaturas de higienização do composto, tendo como consequência o aparecimento do agente patogénico *Escherichia Coli*, no composto final.

De acordo com os ensaios realizados, e o melhor comportamento da mistura 2 nas pilhas de compostagem, o composto obtido durante um período de degradação de 23 de Maio a 18 de Julho, relativo à mistura 2, foi submetido a análises, tendo os resultados sido comparados com os limites atuais de referência.

Para a mistura selecionada, a humidade do composto final foi de 34,1 %, estando de acordo com o limite (< 40 %). A análise granulométrica, para qual se define que 99 % do material deverá passar por um crivo (de malha quadrada) com 25 mm de abertura, permitiu resultados positivos, uma vez que 100 % dos materiais analisados passaram a malha referida. A análise da matéria orgânica levou a resultados distintos para as duas réplicas da mistura 2, dado que uma não cumpriu os requisitos mínimos exigidos (teve teor de matéria orgânica inferior a 30 %). Tal deve-se provavelmente ao facto de nesta réplica a temperatura ainda não ter estabilizado e, consequentemente, a fase de degradação não ter terminado. As concentrações de cádmio, chumbo, cobre, crómio, mercúrio e níquel encontraram-se abaixo do limite máximo para os compostos orgânicos de Classe I, contrariamente ao zinco que ultrapassou o seu limite; contudo, está abaixo do valor máximo para Classe II. Os valores obtidos para HAP e PCB encontraram-se sempre abaixo do limite, o mesmo acontecendo com o pH, que se encontra na gama sugerida (5,5 e 8,5). Em termos de fitotoxicidade, a mistura estudada com maior quantidade de composto (60 % de composto, 30 % terra e 10 % de turfa) foi a que se mostrou mais favorável para o crescimento da alface. Conclui-se, também, que não ocorreu fitotoxicidade na utilização de nenhuma das misturas com composto na sua constituição. A análise microbiológica relativa à *Escherichia Coli* apresentou resultados negativos relativamente à qualidade do composto uma vez que os valores ultrapassaram o limite legal de 1000 UFC/g. Acredita-se que estes resultados se deveram a não terem sido atingidas temperaturas de higienização. Afora

estes resultados das análises microbiológicas, o composto seria classificado como Classe II, que poderia ser genericamente utilizado na agricultura.

De acordo com o acima exposto, após a análise de todos os parâmetros, foi possível concluir que a mistura 2 foi a mais adequada para compostagem; e que uma das réplicas da pilha, no período de análise, chegou mais próximo do final do processo de compostagem e higienização, estando a análise microbiológica mais próxima dos limites legais estabelecidos.

Em relação à aplicação empresarial/industrial, os resultados obtidos permitiram dar início à atividade da Central de Compostagem utilizando a mistura 2. Com o aumento da escala implementada espera obter-se a higienização do material.

## **PROPOSTAS DE MELHORIA/ TRABALHOS FUTUROS**

O trabalho desenvolvido nesta dissertação lançou outras pistas para investigação, especialmente devido à especificidade do processo de compostagem, a escala de experimentação, os materiais envolvidos, a formulação das pilhas e os parâmetros de controlo, entre outros, que deverão ser objeto de futuros trabalhos.

Parece importante desenvolver novas formulações de misturas, cujo objetivo será obter uma maior rentabilidade económica do processo e desenvolver trabalhos experimentais em maior escala, quer na dimensão, quer no tempo, tornando-os mais reprodutíveis/representativos dos processos industriais a implementar, particularmente no sentido de permitirem alcançar as temperaturas de higienização e a fase de maturação do composto, as quais concorrerão substancialmente para aumentar a sua qualidade.

Será também interessante envolver em futuros trabalhos as lamas de ETAR industriais, tendo em vista a procura de uma aplicação para um material de elevada complexidade de processamento, assim como a substituição da cinza de caldeira de biomassa como material de cobertura por outros materiais (pvc, composto maturado), que em muito poderá contribuir para melhor controlo dos parâmetros que a compostagem encerra.



## 5 BIBLIOGRAFIA

- [1] Rocha, C.L.P. (2007 ), *Desenvolvimento de um sistema integrado de gestão de resíduos de natureza orgânica*, in *Secção Autónoma de Ciências Sociais, Jurídicas e Políticas* Aveiro: Universidade de Aveiro.
- [2] Agência Portuguesa do Ambiente (2008), *Dossier de Prevenção (redução) de Resíduos - Nível mais básico*.
- [3] Gonçalves, M.S. (2005), *Gestão de resíduos orgânicos*, ed. SPI – Sociedade Portuguesa de Inovação. S. João do Estoril: Principia, Publicações Universitárias e Científicas.
- [4] Candeias, M. (2008), *Gestão de Lamas de Depuração - Urbanas e de composição similar*: Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional - Inspeção-Geral do Ambiente e do Ordenamento do Território. p. 34.
- [5] Pita, F.A.G. (2002), *Volume II - Tratamento de Águas Residuais Domésticas* in *Armazenamento e Tratamento de Resíduos*Coimbra: Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. p. 54.
- [6] (2011), *Anuário Estatístico de Portugal 2010*, I. Instituto Nacional de Estatística, Editor Lisboa. p. 628.
- [7] Poeira, L. (2002),*Políticas Do Território - A qualificação e o desenvolvimento sustentável*. O País Socioeconómico.
- [8] Rasquilha, F.J.T. (2010), *Contribuição para o tratamento e gestão das lamas em excesso das estações de tratamento de águas residuais - caso de estudo de optimização para a 4 Etar do Conselho de Elvas*, in *Faculdade de Ciências e Tecnologia*Lisboa: Universidade Nove de Lisboa.
- [9] European Commission. *Part I: Overview Report*. Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land 2008 15 de Junho 2012 [cited 2012 24 Junho].
- [10] Sousa, R.J.V.d. (2005), *Estratégias de gestão de lamas das estações de tratamento de águas residuais (ETAR) estrusão de lamas para aplicação na agricultura*. Porto: [s.n.]. XV, 131 f.-XV, 131 f.
- [11] Liu, D.H.F. and B.G. Lipták (1999), *Environmental Engineers' Handbook on CD-ROM*. Taylor and Francis.
- [12] Barth, J. (2006), *Status of organic waste recycling in the EU*, in *European Compost Network*Estonia. p. 3.
- [13] European Commission - Directorate-General Environment (2001), *Working Document - Biological Treatment of Biowaste*.

- [14] Gonçalves, M.S., Baptista, M. (2001), *Proposta de norma técnica sobre qualidade e utilizações do composto*.
- [15] Anónimo (2008), *Especificações Técnicas sobre Qualidade e Utilizações do Composto*, A.P.d. Ambiente, Editor Lisboa.
- [16] Haug, R.T. (1993), *The practical handbook of compost engineering* Lewis Publishers.
- [17] Tchobanoglous, G., F.L. Burton, and H.D. Stensel (2003), *Wastewater engineering: treatment and reuse*, ed. Metcalf and Eddy. McGraw-Hill.
- [18] Corbitt, R.A. (1999), *Standard handbook of environmental engineering*. Second Edition ed.: McGraw-Hill.
- [19] Turovskiy, I.S. and P.K. Mathai (2006), *Wastewater sludge processing* Wiley-Interscience.
- [20] Santos, L.M.d.C. (2001), *Resíduos com interesse agrícola. Evolução de parâmetros da sua compostagem*, ed. I.P.d. Bragança.
- [21] Biddlestone, A.J.G., K.R; Day, Carol A. (1987), Composting and straw decomposition. *Environmental Biotechnology. C. F. Forster e D. A. J. Wase. Ellis Horwood Limited Publishers. Chichester, West Sussex, England*; p. 135-175.
- [22] Campbell, A.G., R.R. Engebretson, and R.R. Tripepi (1991), Composting a combined RMP/CMP pulp and paper sludge. *Tappi journal*, 74 (9): p. 183-191.
- [23] Epstein, E. (2011), *Industrial Composting: Environmental Engineering and Facilities Management*. Taylor and Francis.
- [24] Livestock Engineering Unit & Environmental Practices Unit (2005), *Manure Composting Manual*. Canada: Alberta Agriculture, Food and Rural Development.
- [25] Kreith, F. and G. Tchobanoglous (2002), *Handbook of solid waste management*. 2ª ed.: McGraw-Hill.
- [26] Diaz, L.F., M. De Bertoldi, W. Bidlingmaier, and E. Stentiford (2007), *Compost Science and Technology*, ed. L.F. Diaz, et al.: Elsevier.
- [27] Batista, J.G.F. and E.R.B. Batista (2007), *Compostagem: Utilização de compostos em horticultura*. Universidade dos Açores - CITA-A.
- [28] Wilkinson, K.G., 14. *On-Farm Composting of Dead Stock*, in *Integrated Waste Management*, E.S. Kumar, Editor.
- [29] Insam, H. and M. Bertoldi (2007), *Microbiology of the Composting Process*, in *Compost Science and Technology*, L.F. Diaz, et al., Editors.: Elsevier. p. 26 - 48.
- [30] Krogmann, U. and I. Körner (2008), *Technology and Strategies of Composting*, in *Biotechnology*: Wiley-VCH Verlag GmbH. p. 127-150.
- [31] Diaz, L.F., G.M. Savage, L.L. Eggerth, and A. Chiumenti (2007), *Systems used in composting*, in *Compost Science and Technology*, L.F. Diaz, et al., Editors.: Elsevier. p. 67-87.



- [32] Shamas, N.K. and L.K. Wang (2008), *Biosolids Composting*, in *Handbook of Environmental Engineering - Biological Treatment Processes*, L.K. Wang, N.C. Pereira, and Y.-T. Hung, Editors.: Humana Press. p. 669 - 714.
- [33] Schuchardt, F. (2005), *Composting of Organic Waste*, in *Environmental Biotechnology*: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. p. 333-354.
- [34] Golueke, C.G. and P.H. McGauhey (1953), Reclamation of municipal refuse by composting. *Technical Bulletin 9* p. 89.
- [35] Willey, J.M., L. Sherwood, C.J. Woolverton, and L.M. Prescott (2008), *Prescott, Harley, and Klein's Microbiology*. McGraw-Hill Higher Education.
- [36] Brito, L.M. (2006), *Compostagem para a Agricultura Biológica*, in *Manual de Agricultura Biológica - Terras de Bouro*, Isabel Mourão; José Pedro Araújo; Miguel Brito (Escola Superior Agrária de Ponte de Lima - ESAPL / IPVC), Editor. p. 119 - 137.
- [37] Paul, E.A. and F.E. Clark (1989), *Soil microbiology and biochemistry*. San Diego: Academic Press.
- [38] United States Environmental Protection Agency, United States Department of Agriculture (USDA), and Natural Resources Conservation Service (NRCS) (2010), *Chapter 2 Composting*, in *National Engineering Handbook - Part 637 Environmental Engineering* Washington, DC: US Dept. of Agriculture.
- [39] Diaz, L.F. and G.M. Savage (2007), *Factors that Affect the Process*, in *Compost Science and Technology*, L.F. Diaz, et al., Editors.: Elsevier. p. 49 - 65.
- [40] Russo, M. ( 2004), *Avaliação de Parâmetros que Influenciam a Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos e a sua Importância na Qualidade do Composto: Aplicação e Casos de Estudo*, in *Escola Superior de tecnologia e Gestão*: Instituto Superior Politécnico de Viana do Castelo.
- [41] Bidlingmaier, W. and J. Müsken (2007), *Odor emissions from composting plants*, in *Compost Science and Technology*, L.F. Diaz, et al., Editors.: Elsevier. p. 215 - 324.
- [42] Savage, G.M. and L.F. Diaz (2007), *Bioremediation*, in *Compost Science and Technology*, L.F. Diaz, et al., Editors.: Elsevier. p. 159 - 175.
- [43] British Columbia Ministry of Agriculture and Food (1998), *B.C. Agricultural Composting Handbook*. 2nd ed.: British Columbia.
- [44] Epstein, E. (1997), *The Science of Composting*. CRC Press. 487.
- [45] Martins, O. and T. Dewes (1992), Loss of nitrogenous compounds during composting of animal wastes. *Bioresource Technology*, 42(2): p. 103-111.
- [46] US EPA (2002), *Use of Composting for Biosolids Management*, in *Biosolids Technology Fact Sheet*, U.E.P. Agency, Editor Office of Water, Washington DC: .

- [47] Tittarelli, F., G. Petruzzelli, B. Pezzarossa, M. Civilini, A. Benedetti, and P. Sequi (2007), *Quality and agronomic use of compost*, in *Compost Science and Technology*, L.F. Diaz, et al., Editors.: Elsevier. p. 119 - 157.
- [48] Smith, S.R. (2008), *The Implications for Human Health and the Environment of Recycling Biosolids on Agricultural Land* C.f.E.C.a.W. Management, Editor Department of Civil and Environmental Engineering: Imperial College London.
- [49] European Commission. *Part III: Project Interim Reports*. Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land 2010 15 de Junho 2012 [cited 2012 24 Junho].
- [50] Lazzari, L., L. Spérni, P. Bertin, and B. Pavoni (2000), Correlation between inorganic (heavy metals) and organic (PCBs and PAHs) micropollutant concentrations during sewage sludge composting processes. *Chemosphere*, 41(3): p. 427-435.
- [51] Erhardt, W. and A. Prüëß (2001), *Organic Contaminants in Sewage Sludge for Agricultural Use*.
- [52] ICON (IC Consultants Ltd), Technical University Munich, IRSA Rome, and ECA Barcelona (2001), *Pollutants in urban waste water and sewage sludge*, Luxembourg.
- [53] World Health Organization. Regional Office for Europe (2000), *Air Quality Guidelines for Europe*. World Health Organization, Regional Office for Europe.
- [54] Castro, D.M.O. (2010), *Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos no Ar Ambiente*, in *Engenharia do Ambiente* Faculdade de Engenharia: Universidade do Porto. p. 189.
- [55] Santos, J.L.D.d. (2007), *Caracterização físico-química e biológica em diferentes laboratórios de produtos obtidos a partir da compostagem de resíduos orgânicos biodegradáveis*, in *Departamento de Zoologia e Antropologia* Porto: Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. p. 122.
- [56] Kutzner, H.J. (2008), *Microbiology of Composting*, in *Biotechnology Set*: Wiley-VCH Verlag GmbH. p. 35-100.
- [57] U.S. Environmental Protection Agency - Office of Solid Waste and Emergency Response (1994), *Composting of yard trimmings and municipal solid waste*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response,.
- [58] Leton, T.G. and E.I. Stentiford (1990), Control of aeration in static pile composting. *Waste Management & Research*, 8(4): p. 299-306.
- [59] Puyuelo, B., T. Gea, and A. Sánchez (2010), A new control strategy for the composting process based on the oxygen uptake rate. *Chemical Engineering Journal*, 165(1): p. 161-169.
- [60] Eggerth, L.L., L.F. Diaz, M.T.F. Chang, and L. Iseppi (2007), *Marketing of composts*, in *Compost Science and Technology*, M.d.B.W.B. L.F. Diaz and E. Stentiford, Editors.: Elsevier. p. 325-355.
- [61] Mendes, A.F.T. (2009), *Estudo técnico-económico de uma unidade de co-compostagem de lamas de ETAR*. Porto: [s. n.]. XVIII, 103 p.-XVIII, 103 p.

- [62] Portugal (2006), 2007/64/CE: *Decisão da Comissão, de 15 de Dezembro de 2006 que estabelece os critérios ecológicos revistos e os respectivos requisitos de avaliação e verificação para a atribuição do rótulo ecológico comunitário aos suportes de cultura*, J.O.d.U. Europeia, Editor. p. L 32/137 - L 32/143.
- [63] Portugal (2011), 2011/740/UE: *Decisão da Comissão, de 14 de Novembro de 2011, que altera as Decisões 2006/799/CE, 2007/64/CE, 2007/506/CE, 2007/742/CE, 2009/543/CE e 2009/544/CE a fim de prolongar a validade dos critérios ecológicos para atribuição do rótulo ecológico da UE a determinados produtos*, in C(2011) 8041, J.O.d.U. Europeia, Editor. p. L 297/64 - L 297/65.
- [64] Luo, W., T.B. Chen, G.D. Zheng, D. Gao, Y.A. Zhang, and W. Gao (2008), Effect of moisture adjustments on vertical temperature distribution during forced-aeration static-pile composting of sewage sludge. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(4): p. 635-642.
- [65] Trémier, A., C. Teglia, and S. Barrington (2009), Effect of initial physical characteristics on sludge compost performance. *Bioresource Technology*, 100(15): p. 3751-3758.
- [66] Tognetti, C., M.J. Mazzarino, and F. Laos (2011), Comprehensive quality assessment of municipal organic waste composts produced by different preparation methods. *Waste Management*, 31(6): p. 1146-1152.
- [67] Doublet, J., C. Francou, M. Poitrenaud, and S. Houot (2010), Sewage sludge composting: Influence of initial mixtures on organic matter evolution and N availability in the final composts. *Waste Management*, 30(10): p. 1922-1930.
- [68] Zhang, J., D. Gao, T.-B. Chen, G.-D. Zheng, J. Chen, C. Ma, S.-L. Guo, and W. Du (2010), Simulation of substrate degradation in composting of sewage sludge. *Waste Management*, 30(10): p. 1931-1938.
- [69] Hay, J., H. Ahn, S. Chang, R. Caballero, and H. Kellogg (1988), Alternative bulking agent for sludge composting. *BioCycle*: p. 48 - 52.
- [70] Caricasole, P., M.R. Provenzano, P.G. Hatcher, and N. Senesi (2011), Evolution of organic matter during composting of different organic wastes assessed by CPMAS <sup>13</sup>C NMR spectroscopy. *Waste Management*, 31(3): p. 411-415.
- [71] Vargas-García, M.C., F. Suárez-Estrella, M.J. López, and J. Moreno (2010), Microbial population dynamics and enzyme activities in composting processes with different starting materials. *Waste Management*, 30(5): p. 771-778.
- [72] de Guardia, A., P. Mallard, C. Teglia, A. Marin, C. Le Pape, M. Launay, J.C. Benoist, and C. Petiot (2010), Comparison of five organic wastes regarding their behaviour during composting: Part 1, biodegradability, stabilization kinetics and temperature rise. *Waste Management*, 30(3): p. 402-414.

- [73] de Guardia, A., S. Brunet, D. Rogeau, and G. Matejka (2002), Fractionation and characterisation of dissolved organic matter from composting green wastes. *Bioresource Technology*, 83(3): p. 181-187.
- [74] Himanen, M. and K. Hänninen (2011), Composting of bio-waste, aerobic and anaerobic sludges – Effect of feedstock on the process and quality of compost. *Bioresource Technology*, 102(3): p. 2842-2852.
- [75] Bernai, M.P., C. Paredes, M.A. Sánchez-Monedero, and J. Cegarra (1998), Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technology*, 63(1): p. 91-99.
- [76] Farrell, M. and D.L. Jones (2010), Food waste composting: Its use as a peat replacement. *Waste Management*, 30(8–9): p. 1495-1501.
- [77] Felícia, D.G. (2009), *Estudo do comportamento do resíduo papel no processo de compostagem*, in *Departamento de Ambiente e Ordenamento*: Universidade de Aveiro.
- [78] Fang, M., J.W.C. Wong, K.K. Ma, and M.H. Wong (1999), Co-composting of sewage sludge and coal fly ash: nutrient transformations. *Bioresource Technology*, 67(1): p. 19-24.
- [79] Samaras, P., C.A. Papadimitriou, I. Haritou, and A.I. Zouboulis (2008), Investigation of sewage sludge stabilization potential by the addition of fly ash and lime. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1–3): p. 1052-1059.
- [80] Grigatti, M., C. Ciavatta, and C. Gessa (2004), Evolution of organic matter from sewage sludge and garden trimming during composting. *Bioresource Technology*, 91(2): p. 163-169.
- [81] Sidelko, R., B. Janowska, B. Walendzik, and I. Siebielska (2010), Two composting phases running in different process conditions timing relationship. *Bioresource Technology*, 101(17): p. 6692-6698.
- [82] Rihani, M., D. Malamis, B. Bihaoui, S. Etahiri, M. Loizidou, and O. Assobhei (2010), In-vessel treatment of urban primary sludge by aerobic composting. *Bioresource Technology*, 101(15): p. 5988-5995.
- [83] Margesin, R., J. Cimadam, and F. Schinner (2006), Biological activity during composting of sewage sludge at low temperatures. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 57(2): p. 88-92.
- [84] Tiquia, S.M., N.F.Y. Tam, and I.J. Hodgkiss (1998), Changes in chemical properties during composting of spent pig litter at different moisture contents. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 67(1): p. 79-89.
- [85] Baeta-Hall, L., M.C. Sàágua, M.L. Bartolomeu, A.M. Anselmo, and M.F. Rosa (2002), A compostagem como processo de valorização dos resíduos produzidos na extracção de azeite em contínuo *Boletim de Biotecnologia*: p. 31 - 37.

- [86] Marešová, K. and M. Kollárová (2010), Influence of compost covers on the efficiency of biowaste composting process. *Waste Management*, 30(12): p. 2469-2474.
- [87] Kumar, M., Y.-L. Ou, and J.-G. Lin (2010), Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio. *Waste Management*, 30(4): p. 602-609.
- [88] Fang, M. and J.W.C. Wong (1999), Effects of lime amendment on availability of heavy metals and maturation in sewage sludge composting. *Environmental Pollution*, 106(1): p. 83-89.
- [89] Contreras-Ramos, S.M., D. Alvarez-Bernal, N. Trujillo-Tapia, and L. Dendooven (2004), Composting of tannery effluent with cow manure and wheat straw. *Bioresource Technology*, 94(2): p. 223-228.
- [90] Moreira, I.C.V. and O.C.P. Nunes, A contribution for a quality study of several composts produced in Portugal.
- [91] SIMLIS - Grupo Águas de Portugal. *Mapa do Sistema - Fátima*. 2011 [cited 2012, 10 de Agosto]; Available from: [http://www.simlis.pt/pop\\_fatima.htm](http://www.simlis.pt/pop_fatima.htm).
- [92] Revista da AGROS - União das Cooperativas de Produtores de Leite de Entre Douro e Minho e Trás-os-Montes, U.C.R.L. (2011), *Melhores práticas de ensilagem do milho*, in *A Força da União*. p. 14 - 17.
- [93] Martin, D.L., G. Gershuny, and J. Minnich (1992), *The Rodale book of composting: Easy Methods for Every Gardener*. Rodale Press.
- [94] Gómez-Rey, M.X., M. Madeira, J. Coutinho, and E. Vasconcelos (2010), Efeito da cinza de biomassa na dinâmica do C e N do solo de uma plantação de pinus pinaster. *Revista de Ciências Agrárias*, 33(0871-018X): p. 134 -146.
- [95] Savage, G.M., L.F. Diaz, L.L. Eggerth, UNEP International Environmental Technology Centre, and CalRecovery Inc (2005), *Solid Waste Management - Volume I*. Vol. 1. United Nations Environment Programme.
- [96] Gray, K.R., K. Sherman, and A.J. Biddlestone (1971), A Review of Composting - Part 1. *Process Biochemistry*, 6 (10): p. 22 - 28.
- [97] Cordeiro, N.M. (2010), *Compostagem de resíduos verdes e avaliação da qualidade dos compostos obtidos - caso de estudo da algar S.A.*, in *Engenharia do Ambiente – Tecnologias Ambientais*: Instituto Superior de Agronomia - Universidade Técnica de Lisboa.
- [98] Sousa, D.M.F. (2008), *Aplicação do processo de compostagem na estabilização de dejectos de coelho* in *Departamento de Ambiente e Ordenamento*: Universidade de Aveiro p. 111.
- [99] Fischer, D. and B. Glaser (2012), *Synergisms between Compost and Biochar for Sustainable Soil Amelioration*, in *Management of Organic Waste*, S. Kumar and A. Bharti, Editors. Croatia: InTech. p. 167 - 198.

- [100] Amlinger, F., S. Peyr, J. Geszti, P. Dreher, W. Karlheinz, and S. Nortcliff (2007), *Beneficial effects of compost application on fertility and productivity of soils. Literature Study*, in *Environment and Water Management*, Austria: Federal Ministry for Agriculture and Forestry.
- [101] Hafidi, M., S. Amir, A. Jouraiphy, P. Winterton, M. El Gharous, G. Merlina, and J.C. Revel (2008), Fate of polycyclic aromatic hydrocarbons during composting of activated sewage sludge with green waste. *Bioresource Technology*, 99(18): p. 8819-8823.
- [102] Santos, J.Q., *Fertilização E Ambiente: Reciclagem Agro-Florestal De Resíduos E Efluentes*. Europa-America Pt.
- [103] Varennes, A.d. (2003), *Produtividade dos Solos e Ambiente*. 1ª ed, ed. Escolar Editora.
- [104] Connelly T, L., M. Tilburg C, and L. Yager P (2006), Evidence for psychrophiles outnumbering psychrotolerant marine bacteria in the springtime coastal Arctic. *Limnology and oceanography*, 51(2): p. 1205-1210.
- [105] Silva, M.E., L.T. Lemos, O.C. Nunes, and A.C. Cunha-Queda (2010), *Influence of organic materials residues on the humification process during composting*, in *ORBIT2010*.







## **6 ANEXOS**

### **Anexo I – DESCRIÇÃO DE SISTEMAS ABERTOS E FECHADOS**

#### **1. Sistemas abertos**

##### **1.1. Pilhas de compostagem passiva**

As pilhas de compostagem passiva são um sistema de compostagem de funcionamento muito básico e até pouco referido na literatura. Este método de compostagem começa com a formação da mistura de matéria-prima e deposição numa pilha. Para o restabelecimento da porosidade é realizado um revolvimento periódico da pilha, com um grande regime temporal entre revolvimentos. Já o arejamento dos materiais é realizado por movimento passivo de ar através dos mesmos. Este tipo de arejamento necessita que a pilha montada seja suficientemente pequena para permitir este movimento de ar <sup>[38]</sup>. Outro parâmetro muito importante neste sistema é a mistura de matérias-primas utilizada uma vez que têm de apresentar capacidade para manter a porosidade e a estrutura necessárias dando lugar a um arejamento apropriado ao longo de todo o período de compostagem. Uma das grandes vantagens da utilização do sistema de pilhas de compostagem passiva é exigir baixos custos de operação e manutenção, uma vez que requer uma quantidade mínima de trabalho e de equipamentos <sup>[38]</sup>. Este método é frequentemente usado para a compostagem de folhas e outros resíduos de jardim. Como o arejamento é realizado passivamente, este método é moroso, e apresenta um elevado potencial para o desenvolvimento de condições de anaerobiose e consequentemente para problemas de odor <sup>[38]</sup>.

##### **1.2. Pilhas revolvidas**

O processo de pilhas revolvidas é a tecnologia de compostagem mais antiga e simples e representa a utilização de uma pilha alongada de resíduos que permite o desenvolvimento das características necessárias para o processo de compostagem, podendo também ser utilizada no período de maturação, acoplada a outro método de compostagem <sup>[30]</sup>. Este sistema de compostagem não utiliza reator e exige revolvimento frequente e realizado por equipamento adequado. As pilhas de compostagem também contam com ventilação natural advinda da difusão e convecção do ar <sup>[30]</sup>. A utilização de arejamento forçado positivo ou negativo, isto é, com insuflamento ou sucção de ar, também acontece neste método apesar de ser pouco frequente <sup>[23]</sup>. A grande diferença entre este sistema e o sistema de pilhas de

compostagem passiva (1.1. do Anexo) é o facto de estas serem compridas, ao contrário das anteriores que se podem comparar com um monte (cone normal ou de topo achatado).

Segundo Epstein, E. <sup>[23]</sup>, este tipo de pilhas variam na sua largura e altura, dependendo do equipamento utilizado para as revolver sendo que, normalmente, as medidas estão entre os 1,5 e 2,7 m de altura e entre 2,7 e 6,1 m de largura, guardando sempre um espaço entre as pilhas para a movimentação dos equipamentos. Estas medidas variam de autor para autor, mas rondam sempre os mesmos valores.

Outro fator que influencia a altura máxima das pilhas de compostagem deste sistema é a tendência do material utilizado para compactar <sup>[31]</sup>.

A máquina de revolvimento mistura o material de modo a que, durante o período da compostagem, todas as partículas sejam expostas às exigências de temperatura aplicáveis <sup>[23]</sup>. Permite também aumentar a porosidade da mistura, homogeneizá-la e quebrar materiais ainda com dimensões demasiado elevadas. A homogeneização da mistura promove, consequentemente, um equilíbrio do teor de humidade e do gradiente de temperaturas na pilha <sup>[30]</sup>. A sua atuação consiste em levantar, revolver, formar e até às vezes humedecer a pilha de compostagem <sup>[30]</sup>. A necessidade de adição de água ao processo advém do facto de este revolvimento promover a secagem dos materiais (evaporação e libertação de água) <sup>[31]</sup>. O efeito deste revolvimento no fornecimento de oxigénio às várias partes da pilha é muito reduzido apesar de acontecer <sup>[30]</sup>.

As máquinas revolvedoras podem ser conduzidas sobre as pilhas ou atreladas a um veículo que se desloca ao lado da pilha (Figura I-1 e I-2) <sup>[30]</sup>.

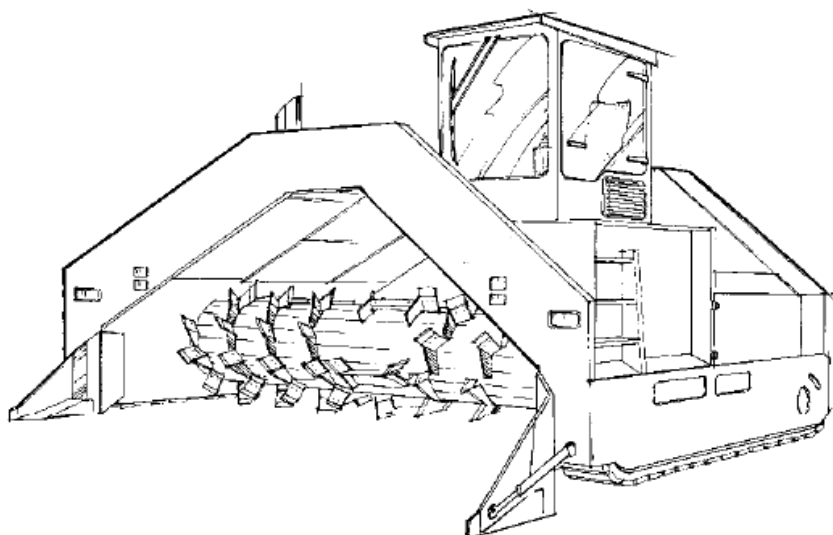


Figura I-1– Desenho máquina revolvedora (Adaptado de Schuchardt, F. <sup>[33]</sup>).



Figura I-2 – Fotografia da Máquina revolvedora Backhus 16.30 da empresa Gintegral.

A frequência de revolvimento diminui desde a fase de degradação até à fase de maturação e estabilização sendo que durante a fase de maturação pode até não haver revolvimento <sup>[30]</sup>. As pilhas são revolvidas e misturadas periodicamente durante o processo de compostagem, sendo que, tal como já foi referido, podem ser aplicados sistemas de arejamento forçado suplementar <sup>[17]</sup>. Em condições de operação normais, estas pilhas são revolvidas no mínimo cinco vezes enquanto a temperatura for igual ou superior a 55 °C. Uma vez que as condições aeróbias no interior da pilha são difíceis de manter e que estas dependem fortemente da frequência de revolvimento da mesma, este parâmetro tem de ser cuidadosamente controlado <sup>[17]</sup>. Por outro lado, o revolvimento promove a libertação de maus odores, causados pela ocorrência de nichos onde o processo se tornou anaeróbio <sup>[17]</sup>.

Segundo Golueke, C. G. & McGauhey, P. H. <sup>[34]</sup>, quando são adicionados materiais estruturantes como palha, cascas de arroz, relva ou folhas secas, lascas de madeira ou serradura e se o teor de humidade da mistura inicial for de cerca de 60 %, o revolvimento ao terceiro dia após a construção da pilha original e nos quatro dias seguintes é suficiente para atingir uma taxa de compostagem elevada. Após o quarto revolvimento, a frequência pode ser reduzida para uma vez a cada 4 ou 5 dias <sup>[34]</sup>.

Na maioria dos casos, o revolvimento em elevada frequência permite atingir menores tempos de processo mas elevados custos de operação <sup>[30]</sup>.

Segundo Diaz, L. F. *et al.* <sup>[31]</sup>, este sistema de compostagem em “windrow” pode também ser adaptado para um sistema quase contínuo, adicionando sucessivamente os

resíduos que chegam ao local a uma das extremidades da pilha e removendo o material compostado do lado oposto, à medida que este se encontra estabilizado.

### **1.3. Pilhas estáticas - Arejamento natural/forçado**

A principal diferença entre o sistema de pilhas revolvidas e as pilhas estáticas prende-se com o facto de estas últimas não serem agitadas ou revolvidas. Esta falta de agitação obriga a que sejam mantidas condições adequadas de porosidade durante a maior parte do tempo de processo. Deste modo, a mistura de resíduos inicial tem de ser controlada relativamente a este parâmetro, sendo imprescindível garantir que apresenta uma porosidade adequada ou adicionar um agente estruturante para a corrigir se não apresentar a estrutura adequada <sup>[30]</sup>.

Normalmente este tipo de pilhas apresenta forma de pirâmide truncada (de topo achatado) com dimensões entre 12 e 15 metros na base e altura até 3 metros. São frequentemente cobertas com uma camada de composto maduro, no sentido de prevenir grandes perdas de calor da camada exterior da pilha e a libertação de odores indesejados <sup>[30]</sup>. O oxigénio é mantido em valores entre 5 e 15 % através do auxílio de sopradores de ar, normalmente controlados automaticamente por um temporizador (no caso de arejamento forçado) <sup>[30]</sup>.

A maior parte dos sistemas estáticos promove o arejamento utilizando sistemas de ventilação, isto é, por arejamento forçado. Já um sistema estático denominado “pilha passivamente arejada”, baseia-se na convecção do ar no interior da pilha para o fornecimento de oxigénio e o alcance das temperaturas necessárias para destruição de agentes patogénicos e para estabilização <sup>[23]</sup>.

Em pilhas sem arejamento ativo, normalmente são aplicados tubos de arejamento para permitir reforçar a ventilação natural no interior da pilha <sup>[30]</sup>. Estes tubos são perfurados e abertos para a atmosfera <sup>[23]</sup>. Assim, a matéria-prima previamente misturada com um agente estruturante é amontoadada sobre os tubos acima referidos até à formação da pilha, o que vai possibilitar que, à medida que o centro da pilha aquece, o ar fresco seja puxado através dos tubos proporcionando o fornecimento de oxigénio necessário <sup>[23]</sup>.

Este processo alcança muito rapidamente temperaturas de redução de agentes patogénicos, que se mantêm consistentemente elevadas durante todo o período de compostagem, permitindo maior rapidez. Tem potencial como uma tecnologia de baixo custo para uso pelos agricultores para a compostagem de resíduos animais <sup>[23]</sup>.

Os tempos de retenção típicos deste sistema de compostagem são 21 dias, seguidos de 6 a 8 semanas de maturação em pilhas *windrow* <sup>[30]</sup>.

## 2. Sistemas Fechados

### 2.1. Reator Horizontal

Este tipo de reatores são unidades que, tal como o nome indica, operam na posição horizontal e podem ser classificados em vários tipos tais como *canais ou trincheiras, células, recipientes* e túneis <sup>[31]</sup>.

#### 2.1.1. Canais ou trincheiras

Sistema normalmente constituído por longos canais paralelos, onde os materiais são compostados <sup>[38]</sup>. Apresenta semelhanças com o sistema pilhas revolvidas e a sua principal diferença prende-se com o facto de na compostagem em canais ou trincheiras, o material a compostar ser colocado entre paredes. Estas paredes têm uma altura normalmente compreendida entre 1 e 3 metros e são colocadas a uma distância de cerca de 6 metros. O seu comprimento ronda geralmente os 50 metros <sup>[31]</sup>. Para o funcionamento correto do processo, este sistema utiliza a injeção de ar (arejamento forçado) normalmente por uma base perfurada com a qual os canais são equipados, através da massa a compostar, mantendo deste modo as condições de aerobiose, associada a um revolvimento mecânico para que a porosidade seja mantida próximo do ideal, para que a compactação não prejudique o processo e para que a mistura seja mantida o mais homogénea possível <sup>[95]</sup>. Este equipamento de revolvimento desloca-se normalmente sobre um tipo de carris montados de ambos os lados do leito e a todo o seu comprimento, ao longo das paredes de betão dos canais <sup>[38]</sup>.

Savage, G. M. *et al* <sup>[95]</sup> refere que, depois de alguns ajustes na frequência de passagem do equipamento de revolvimento, poderia ser até eliminado o arejamento forçado sem que seja adversamente afetado o desempenho do processo, a não ser que o arejamento forçado seja utilizado como meio de controlo da temperatura <sup>[95]</sup>.

Todos os sistemas em canal ou trincheira estão colocados no interior de edifícios ou cobertos por telhados, sendo que, em construções mais recentes, o edifício é munido de um sistema de aspiração de ar (ar interior mantido sobre pressão negativa) para que o seu impacto negativo seja o mínimo possível. Após a remoção de ar do edifício, este é encaminhado para um biofiltro ou outro tipo de equipamento de tratamento de ar <sup>[31]</sup>.

O material a compostar é normalmente transportado para o canal por uma correia transportadora, ou por unidades automatizadas que utilizam um parafusos de Arquimedes e

removidos por processos semelhantes. Alguns sistemas menos recentes utilizam pás carregadoras frontais como meio de carga e descarga de materiais <sup>[31]</sup>.

A base das pilhas colocadas nos canais podem ser plataformas de betão ou, já mais elaboradas, construídas de um material poroso, como cascalho, para permitir um maior fluxo de ar sob o composto <sup>[38]</sup>.

O funcionamento destes sistemas pode ocorrer em modo “batch” ou em modo contínuo, isto é, o material pode só ser depositado no canal quando o material do processo anterior já tiver sido submetido à primeira fase de tratamento e removido (modo *batch*) ou o material de entrada é colocado no canal numa base diária (modo contínuo) <sup>[31]</sup>. Segundo *Diaz, L. F. et al* <sup>[31]</sup>, existem ainda várias classificações para os sistemas em canal em modo contínuo, entre as quais se podem evidência duas com base na direção do movimento do material a tratar – Movimento longitudinal e lateral. Assim, nos chamados “*Canais longitudinais*” o material a compostar move-se desde o ponto de carregamento do canal até ao local de recolha do composto tratado. Este movimento longitudinal é efetuado por um equipamento de revolvimento e, deste modo, o tempo necessário para que uma determinada porção de material chegue de um extremo a outro do canal depende das características deste equipamento <sup>[31]</sup>. Na Figura 17 encontra-se representado esquematicamente um destes sistemas.

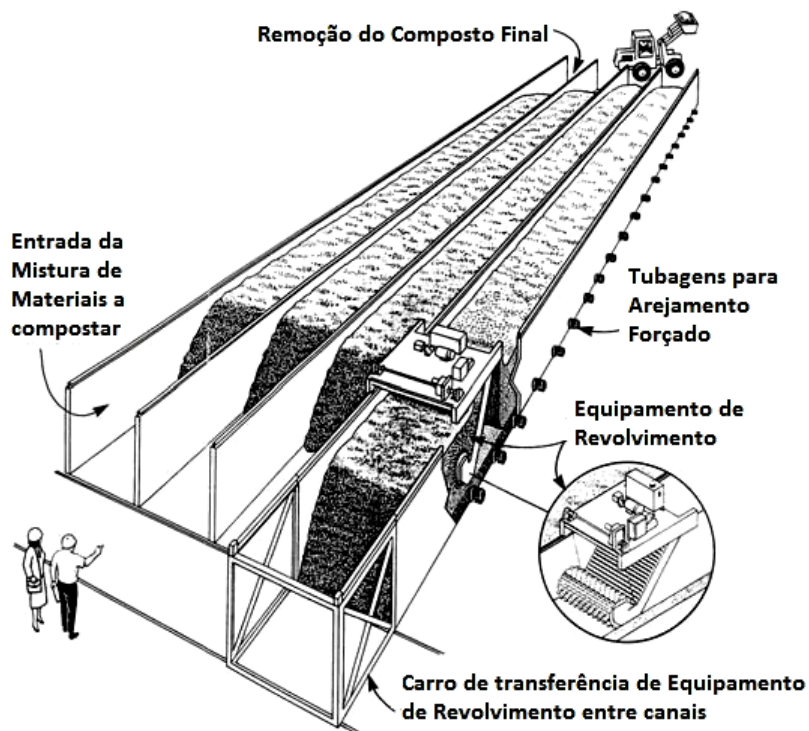


Figura I-3 – Esquema do sistema de compostagem em canais ou trincheiras (Adaptado de British Columbia Ministry of Agriculture and Food <sup>[43]</sup>).

Num caso geral, apresentado por Diaz, L. F. *et al* <sup>[31]</sup> e USEPA *et al* <sup>[38]</sup>, é referido que grande parte dos modelos utilizados destes equipamentos de revolvimento, permitem a movimentação do material em cerca de 2 a 3 m por ciclo de revolvimento, resultando que, durante a fase intensiva de decomposição (primeira fase do processo), o tempo de retenção para o material seja de cerca de 4 semanas. Além disso, o tempo de retenção neste sistema, tal como na maioria dos restantes, depende do grau de revolvimento desempenhado pelo equipamento, da disponibilidade de um sistema de arejamento forçado, e da frequência de revolvimento <sup>[31]</sup>. Claro está que todos estes parâmetros devem ser estudados tendo em conta as características do material. Os canais longitudinais podem ainda ser subdivididos dependendo da sua forma, que pode variar entre reta, elíptica, e em forma de U <sup>[31]</sup>.

Por outro lado, nos “*Canais de movimento lateral*” o material de compostagem é transferido lateralmente, pela máquina de revolvimento, para a linha de tratamento seguinte. A transferência do material pode também ser efetuada com utilização de transportadores de tapete ou correia e ocorre a cerca de cada 2 a 3 dias, dependendo da capacidade volumétrica do canal <sup>[31]</sup>. Geralmente, os modelos de compostagem em canais de movimento lateral incluem a utilização de arejamento forçado e dependem da utilização de tapetes transportadores para encaminharem o material para a zona de maturação <sup>[31]</sup>.

### **2.1.2. Células**

Segundo Diaz, L. F. *et al* <sup>[31]</sup> os sistemas em célula, também conhecidos como “biocells”, podem ser descritos como “unidades hermeticamente fechadas, geralmente de forma retangular” nas quais se realiza o processo de compostagem e onde o mesmo pode ser otimizado pelo ambiente fechado em que ocorre. Refere também que este sistema tem sido objeto de estudo e nos últimos 10-15 anos <sup>[31]</sup>.

As células são essencialmente processos descontínuos (*batch*) e podem ser construídas no local ou ser pré-fabricadas <sup>[31]</sup>.

O isolamento térmico é incorporado em todas as superfícies exteriores, para que as perdas de calor sejam mínimas. Tipicamente, as operações são iniciadas com a introdução do material nas células, por meio de pás carregadoras frontais de pneus ou outro equipamento de utilidade semelhante. A partir do momento em que a unidade se encontre completa, a célula é fechada e dá-se início ao processo de compostagem. Normalmente, o período de compostagem intensiva dura aproximadamente 14 dias. As variações de tempo do processo são função do tipo de material <sup>[31]</sup>.

O fornecimento de oxigénio à massa de compostagem é realizado por meio de um sistema de arejamento forçado, sendo o ar inserido, através da base da célula por meio de tubos ou canais perfurados. A exaustão do ar é realizada pelo topo da célula e normalmente encaminhada para algum sistema de tratamento de ar, como o biofiltro, podendo também ser o ar parcialmente recirculado. O teor de humidade é controlado sendo que, quando necessário, pode ser adicionada água à biomassa utilizando um sistema de irrigação na parte superior da célula (bocais e tubos). O excesso de humidade é controlado pela recolha de lixiviado na base da célula, podendo este ser recirculado e utilizado quando o teor de humidade precisar de ser aumentado <sup>[31]</sup>.

Finalmente, após a conclusão do processo, o composto é removido da célula com uma pá carregadora frontal <sup>[31]</sup>. Em termos gerais estes sistemas apresentam capacidades entre 100 e 1000 m<sup>3</sup>, sendo que as medidas típicas apresentadas são de 6 m de altura, 4 m de largura, e mais de 50 m de comprimento. A compactação do material bem como a distribuição de ar ao longo da matriz a compostar deve ser controlada, sendo para este fim, normalmente, verificada a altura do material no interior do recipiente <sup>[31]</sup>.

### **2.1.3. Contentores**

Este sistema utiliza contentores de forma retangular com uma capacidade volumétrica que pode variar entre 20 e 40 m<sup>3</sup> segundo Diaz, L. F. *et al* <sup>[31]</sup> e 20 e 25 m<sup>3</sup> segundo Krogmann, U., & Körner, I. <sup>[30]</sup>. Estes recipientes são geralmente instalados em módulos (entre 6 a 8 contentores) e o carregamento de material a compostar é realizado pelo seu topo e com auxílio de uma correia transportadora ou de uma pá carregadora frontal<sup>[31]</sup>. O arejamento é realizado por injeção de ar na massa a compostar (arejamento forçado) pelo fundo do contentor que posteriormente é removido e encaminhado para um sistema de tratamento de ar, como por exemplo um biofiltro, tal como acontece na maioria dos sistemas de compostagem fechados <sup>[31]</sup>. Para o controlo da humidade durante o processo de compostagem, este tipo de reatores é munido com características capazes de resolver qualquer um dos extremos deste parâmetro. O excesso de humidade é eliminado pela ação da gravidade, que provoca o seu escoamento pelos orifícios localizados na base dos contentores. Já a falta de humidade é controlada por um sistema de adição de água, com o qual este tipo de recipientes é equipado <sup>[31]</sup>.

Para a remoção do material dos reatores, normalmente cerca de 8 a 15 dias depois do início do processo, é utilizada uma porta localizada numa das extremidades por onde sai o



composto depois de ser promovida a inclinação desse recipiente, geralmente por um camião basculante <sup>[31]</sup>.

Krogmann, U., & Körner, I. <sup>[30]</sup> distinguem ainda os reatores em caixa que são sistemas bastante semelhantes ao sistema de túnel, mas mais curto. Os volumes destes sistemas vão desde os 50 e 60 m<sup>3</sup> até aos 250 m<sup>3</sup>.

O autor Epstein, E. <sup>[23]</sup> agrupa vários sistemas que considera semelhantes entre os quais o de Caixa, Contentor, Saco e Túnel. Define-os como principalmente aplicáveis em pequenas instalações e como muito eficazes no controlo de odores. Estes sistemas são geralmente ventilados e horizontais, sendo que as principais diferenças entre eles são a forma como são carregados, descarregados e ventilados <sup>[23]</sup>.

A colocação do material no sistema pode ser realizada de diversas formas, sendo que normalmente são carregados ou descarregados com pás carregadoras frontais. Também podem ser utilizados métodos de transporte tais como “transportadores telescópicos” ou outro tipo de equipamentos especializados para carregamento. A descarga é realizada através de pás carregadoras frontais, pisos movimentáveis ou pela inclinação do recipiente permitindo o deslizamento do material para o exterior <sup>[23]</sup>.

#### **2.1.4. Túneis ou biotúneis**

Este sistema é essencialmente constituído por uma estrutura retangular, de betão, metal ou tijolo e com um bom isolamento. Segundo Diaz, L. F. *et al* <sup>[31]</sup> as dimensões típicas de um túnel são de cerca de 4 a 5 m de largura, 3 a 4 m de altura, e até 30 m de comprimento, medidas estas ligeiramente dispare das sugeridas por Krogmann, U., & Körner, I. <sup>[30]</sup> que refere larguras e alturas típicas com valores entre 4 e 6 m e 30 a 50 m de comprimento.

Relativamente ao funcionamento deste sistema, o material a compostar é inserido numa das extremidades do túnel, de forma constante e diária. Seguidamente, ao longo do período de compostagem, o material é movido no sentido da extremidade oposta com o auxílio de diversas ferramentas entre as quais um êmbolo hidráulico (forçando o material a deslocar-se para a frente) ou uma placa vibratória (movimento de vaivém) <sup>[31]</sup>.

O teor de humidade é monitorizado, sendo que os equipamento de controlo de humidade mais frequentemente utilizados nestes sistemas são os injetores, colocados no teto do túnel e que atuam sempre que a humidade estiver demasiado baixa utilizando não só água mas também lixiviados e condensados <sup>[30]</sup>.

Também os níveis de oxigénio são monitorizados, podendo ser adicionado ar, conforme necessário utilizando compressores, isto é, por arejamento forçado <sup>[31]</sup>. Outro

método de adição de ar é através de ventiladores centrífugos, que se mostram vantajosos em relação aos compressores uma vez que a emissão de ruído é bastante inferior. O controlo do odor e a remoção do ar são realizados por pressão negativa, sendo que algum do ar pode, ainda, ser recirculado para o processo. O controlo do sistema é efetuado por computador e o tempo de retenção do material no sistema até que o processo tenha acabado ronda as duas semanas<sup>[31]</sup>.

Os reatores em túnel incluem compostagem estática e agitada, com diferentes níveis de controlo, sendo utilizados para a compostagem de uma elevada diversidade de materiais<sup>[30]</sup>.

Os perfis de temperaturas e humidade relativamente homogéneos que este sistema permite manter devem-se à elevada quantidade de ar recirculado e resultam numa menor necessidade de revolvimento para homogeneização destes dois parâmetros<sup>[30]</sup>.

O número de túneis a construir é escolhido tendo em conta a capacidade da instalação em questão. Cada túnel é controlado separadamente, sendo que, consoante as características que este apresentar, é adicionado ar fresco, ar recirculado ou uma mistura dos anteriores pela base da estrutura. A alimentação com resíduos e remoção de composto é realizada pela abertura das escotilhas ou portas<sup>[30]</sup>.

Krogmann, U., & Körner, I.<sup>[30]</sup> refere que, se o tempo de retenção previsto for curto, como por exemplo de uma semana, pode não ser necessária a realização de agitação, apesar de poder precisar de um período de maturação em pilha revolvida. O revolvimento pode ser realizado por remoção total do material de um túnel, colocando-o noutra túnel ou por meio de equipamentos de revolvimento que podem ser fixos para cada túnel ou móveis, com capacidade de movimentação de um túnel para outro<sup>[30]</sup>.

## **2.2.Reator Vertical**

Este tipo de sistemas utiliza normalmente algum tipo de recipiente ou tanque, frequentemente de formato cilíndrico, fabricado em diversos tipos de materiais tais como aço e betão. A capacidade destes tanques vai de alguns metros cúbicos até cerca de 1500 m<sup>3</sup> e são, geralmente, isolados termicamente<sup>[31]</sup>. Nos modelos mais comuns deste sistema o material a compostar é introduzido na parte superior e retirado pela base da unidade. A remoção do material é geralmente executada por um parafuso sem fim permitindo, deste modo, que o processo funcione em modo contínuo<sup>[31]</sup>.

As necessidades de oxigénio dos microrganismos presentes são satisfeitas por arejamento forçado. Dentro dos vários sistemas de arejamento forçado existentes podem ser

referidos como mais frequentes os efetuados por tubos inseridos no reator, pelos quais o ar é inserido e removido, e os efetuados pelo topo do reator, que utiliza um coletor de ar por onde o ar é removido. Após a remoção do ar este é geralmente encaminhado para um sistema de tratamento de ar sendo que, segundo *Díaz, L. F. et al* <sup>[31]</sup>, a maioria dos projetos realizados entre o final de 1980 e o início de 1990 utilizavam um sistema de lavagem química para este efeito <sup>[31]</sup>.

Nos reatores usados neste sistema, o material a compostar movimenta-se verticalmente num fluxo de massa que pode ir desde o topo até ao fundo do mesmo, como um sistema de fluxo pistão ou, se ocorrer recirculação do material do local de saída do composto novamente para o topo do reator, como um sistema misto. Já a adição de oxigénio é realizada por arejamento forçado, pela base do reator ou por tubagens verticalmente inseridas no material. Esse processo pode também ser executado por fases e de forma totalmente automatizada <sup>[33]</sup>.

Os principais problemas deste tipo de sistemas são o excesso de compactação, o arejamento inadequado e a dificuldade na extração do material <sup>[23]</sup>.

### **2.2.1. Túnel /Tambor (compostagem acelerada)**

No sistema de túnel, os resíduos são adicionados num tambor horizontal em rotação lenta, cuja capacidade de enchimento é de aproximadamente 50% e com arejamento forçado <sup>[33]</sup>. O material é transportado (fluxo pistão) na via helicoidal desde uma das extremidades do tambor para a outra e é intensamente misturado ao longo deste processo. Quando o processo de compostagem é realizado neste tipo de reatores, o aumento de temperatura inicia-se pouco tempo depois de o material ser adicionado e é possível a adição de água ao longo do processo <sup>[33]</sup>.

Epstein, E. <sup>[23]</sup> chama a atenção para alguns problemas encontrados neste tipo de sistemas como, por exemplo, odor excessivo e questões operacionais. Duas das instalações que este autor refere só utilizam estes tambores para a mistura dos materiais <sup>[23]</sup>, <sup>[33]</sup>. Outro defeito apontado por Epstein, E. <sup>[23]</sup> é a dificuldade na obtenção de valores de temperatura elevados e consequente limitação da degradação biológica do material <sup>[23]</sup>.

O tempo de retenção dos materiais no tambor varia de acordo com a tecnologia utilizada. Uma vez que a compostagem dos resíduos e a maturação do composto se apresentam incompletos é normalmente necessária a utilização de um outro sistema para a finalização da estabilização do composto, como pilhas estáticas ou revolvidas <sup>[23]</sup>. A Figura I-4 representa um *layout* comum das instalações que utilizam este tipo de sistemas.

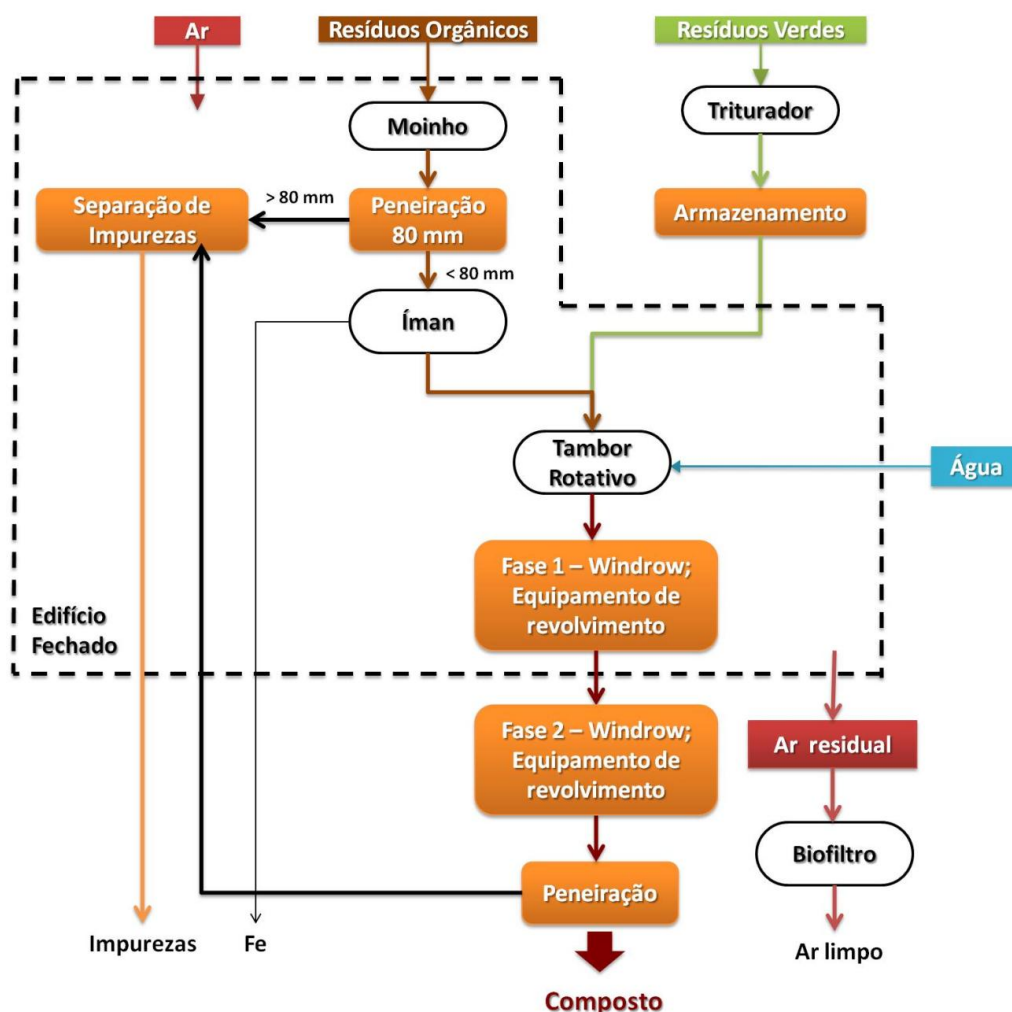


Figura I-4 - Fluxograma de instalação de compostagem com tambor rotativo em edifício fechado (Adaptado de Schuchardt, F. <sup>[33]</sup>).

Este tipo de instalações são caracterizadas por possuírem um local fechado para receber a resíduos biológicos, preparando-os para o processo de degradação biológica (estilhamento, separação das impurezas, etc.), pela degradação em tambor, e maturação e estabilização em pilhas revolvidas (*windrow*). Todo o ar residual contaminado é recolhido e tratado por um biofiltro ou equipamento de tratamento de ar semelhante <sup>[33]</sup>. Tal como já foi referido, a fase de maturação do composto orgânico é realizada em pilhas revolvidas, sendo esta a única fase do processo de compostagem que ocorre sob condições climáticas naturais, contando normalmente com um telhado para as proteger da precipitação. Algumas das unidades de compostagem são totalmente fechadas sendo que, nestes casos, até a fase de maturação ocorre em edifício fechado <sup>[33]</sup>.

O tempo de retenção do material neste equipamento vai geralmente desde as 24 horas até aos sete dias, dependendo das especificações do fabricante, sendo que, após esse período, ainda é realizada uma fase de maturação fora do equipamento <sup>[23]</sup>.

## Anexo II – CLASSIFICAÇÃO DOS MICRORGANISMOS

Tendo em conta Willey, J.M., et al. <sup>[35]</sup> os microrganismos podem ser classificados relativamente à sua temperatura preferencial de crescimento e desenvolvimento. Assim, podem ser divididos em cinco grupos:

- Psicrófilos: Crescem facilmente a baixas temperaturas, como por exemplo 0 °C, tendo como temperaturas ótimas de crescimento  $\leq 15$  °C. A temperatura máxima para o seu desenvolvimento é de cerca de 20 °C <sup>[104]</sup>. São considerados um amplo grupo (bactérias, fungos, algas e protozoários) propício a contaminar alimentos e outros substratos refrigerados.
- Psicrotróficos: Muitas espécies de psicrotróficos crescem num intervalo de temperaturas dos 0 aos 7 °C, embora o intervalo ótimo seja entre 20 e 30 °C, com temperatura máxima de crescimento de cerca de 35 °C. As bactérias psicrotróficas e os fungos são os principais fatores de deterioração dos alimentos refrigerados.
- Mesófilos: São microrganismos com taxa de crescimento ótima no intervalo de temperaturas entre 20 e 45 °C, sendo que o limite mínimo pode chegar por vezes aos 15 °C. É a categoria onde se enquadram a maioria dos microrganismos. Também grande parte dos patogénicos humanos se incluem neste grupo, tal como seria de esperar, uma vez que a temperatura ambiente se encontra normalmente neste intervalo.
- Termófilos: Estes microrganismos têm um intervalo de temperaturas para taxa de crescimento ótima de 55 e 65 °C, apesar do intervalo mais comum para o seu desenvolvimento ter como valor máximo e mínimo 45 aos 55 °C, respetivamente.
- Hipertermófilos: Alguns microrganismos termófilos podem crescer a 90 °C, ou acima, sendo que alguns têm valores máximos acima de 100 °C. Os que têm crescimento ótimos entre 80 °C e cerca de 113 °C são geralmente denominados hipertermófilos. Os organismos pertencentes a este último grupo geralmente não crescem abaixo de 55 °C.

### Anexo III - COMPOSTOS NATURAIS USADOS COMO SUBSTRATO PARA A DECOMPOSIÇÃO

Tabela 6 - III-1 - Principais compostos naturais usados como substrato para a decomposição (Adaptado de Insam, H. and M. Bertoldi<sup>[29]</sup>).

Composto	Composição	Função	Degradabilidade
Lignina	Polimerizado de derivados de fenilpropano, por exemplo, álcool coniferílico	Composto Estrutural	Muito resistente, maioritariamente por fungos
Celulose	Polímeros de glicose ( $C_6H_{10}O_5$ ) <sub>n</sub>	Composto estrutural (folhas de plantas, caules)	Fácil, principalmente por fungos, mas também bactérias, actinomicetes
Amido		Composto de armazenamento nas sementes e raízes	Boa, aeróbia e anaerobiamente
Glicogénio		Nos músculos dos animais	Boa
Laminarina		Algas Marinhas (Phaeophyta)	Razoável
Paramylon		Algas (Euglenophyta e Xanthophyta)	Razoável
Dextrano		Cápsulas ou camadas de bactérias	Razoável
Agar		Algas Marinhas (Rhodophyta)	Resistente
Suberina, cutina	Altos ésteres poliméricos de ácidos gordos saturados e insaturados	Composto Estrutural	Pobre
Hemiceluloses	Baixo grau de polimerização de monómeros de açúcar e ácidos urónicos; geralmente 20 - 100 monómeros	Composto da parede celular nas sementes, palha, madeira, algas	Variável, muitas vezes juntamente com a lignina
• Xylan • Arabin • Mannan • Galactan			
Pectina	Polímero de ácidos galacturónico ( $3 \times 10^4$ - $5 \times 10^5$ monómeros)	Dissolvido, na parede das células, em sementes, frutos, e nas peças de madeira jovens	Fácil, pela maioria dos microrganismos incluindo agentes patogénicos
Sacarose	Dissacarídeo de Glucose-frutose	Vacúolos	Muito fácil pela maioria dos microrganismos
Lactose	Dissacarídeo Glicose-Galactose	Leite	Fácil por bactérias lácticas
Ácido hialurónico	Polissacarídeo de ácido glucurónico e N-acetilglucosamina	Tecido conjuntivo	Fácil
Clorofila e outros pigmentos		Plastídios	Fácil
Alcaloides, taninos	Açúcares principalmente $\alpha$ -D-glicose	Vacúolos	Variável
Gorduras, ceras	Ácidos gordos e glicerina	Composto de armazenamento	Variável
DNS, RNS	Núcleos de ácidos nucleicos	Mitocôndrias	Fácil
Poli- $\beta$ -hidroxi-butírico		Vacúolos, composto de armazenamento	Fácil
Mureína	Peptidoglicano	Parede celular de bactérias	Fácil
Quitina	Poli-N-acetilglucosamina	Parede celular de fungos; crustáceos, insetos	Razoável

## Anexo IV - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DESEJÁVEIS PARA O COMPOSTO

Tabela IV-1 – Algumas das características físicas desejáveis para o composto (Adaptado de Eggerth, L.L. <sup>[60]</sup>).

Parâmetro	Observações
<b>Cor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escurecimento do material ao longo do processo.</li> <li>• O material escuro é normalmente associada a maior estabilidade, maturidade, e uma elevada concentração de matéria orgânica.</li> </ul>
<b>Tamanho das Partículas</b>	<p>A distribuição do tamanho do composto:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desempenha um papel muito importante no armazenamento, embalagem, distribuição e utilização final do material.</li> <li>• Determina a textura do solo tendo um impacto sobre a produtividade do solo.</li> </ul>
<b>Odor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Método de avaliação relativamente simples, prático para monitorar o estado do processo de compostagem.</li> <li>• A presença de odores desagradáveis durante o processo é geralmente indicação de que foram estabelecidas condições de anaeróbicas.</li> <li>• A presença contínua de um forte odor de terra pode significar que o processo de compostagem está concluído.</li> </ul>
<b>Contaminantes</b>	<p>O composto final não deve conter contaminantes identificáveis, tais como:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pedras;</li> <li>• Partículas de vidro;</li> <li>• Peças relativamente grandes de metal e plástico;</li> <li>• Sementes de ervas daninhas nocivas;</li> <li>• Metais pesados;</li> <li>• Compostos tóxicos;</li> <li>• Agentes patogénicos.</li> </ul>
<b>Teor de Humidade</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deve ser inferior a 50% para promover a facilidade de manuseamento, a aplicação e o transporte;</li> <li>• Não deve ser excessivamente seco (inferior 30% de humidade)</li> </ul>
<b>Conteúdo de Nutrientes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Os nutrientes mais importantes para as plantas incluem o azoto, fósforo e potássio;</li> <li>• Nutrientes menos significativos incluem cobre, ferro, manganês, e boro.</li> </ul>
<b>Matéria Orgânica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A utilidade do composto depende da sua capacidade para aumentar a concentração de húmus no solo, uma vez que este aumenta a friabilidade e retenção de água do solo.</li> <li>• É importante ter em conta a qualidade das matérias-primas utilizadas.</li> </ul>

## Anexo V – TABELAS DE APOIO À REVISÃO BIBLIOGRÁFICA RECENTE

Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[83]	40% (v/v) lama 60% (v/v) resíduos verdes	Duas pilhas trapezoidais, 40 m de comprimento, 4 m de largura 2 m de altura Volume $\cong 200 \text{ m}^3$ .	<p><b><u>Arejamento:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ventilação forçada (durante as primeiras 3 semanas de compostagem)</li> <li>- ventilador de extração</li> </ul> <p><b><u>Cobertura:</u></b></p> <p><u>Pilha (A)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 5 cm de composto maduro</li> </ul> <p><u>Pilha (B):</u> sem cobertura;</p> <p><b><u>Revolvimento:</u></b></p> <p><u>Pilha (A)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- pela primeira vez 3 semanas após início;</li> <li>- a partir daí 1 vez por semana;</li> </ul> <p><u>Pilha (B)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2 vezes por semana.</li> </ul>	<p><b>Temperatura</b> máxima (34 dias): <u>Pilha A</u> - <math>66 \pm 4 \text{ }^\circ\text{C}</math> <u>Pilha B</u> - <math>48 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}</math></p> <p><b>Temperatura</b> final (48 dias): <u>Pilha A</u> - <math>56 \pm 4 \text{ }^\circ\text{C}</math> <u>Pilha B</u> - <math>44 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}</math></p> <p><b>Massa seca</b> inicial: <math>40 \pm 3\% \text{ m/m}</math>. final: <u>Pilha A</u>: <math>32 \pm 0,4\%</math>; <u>Pilha B</u>: <math>53 \pm 5\%</math>;</p> <p><b>pH</b> inicial: <math>7,1 \pm 0,3</math>; final: <u>Pilha A</u> – 6,7; <u>Pilha B</u> – 6,5;</p> <p><b>Razão C/N</b> inicial: <u>Pilha A</u> – 25,8; <u>Pilha B</u> - sem variação; final: <u>Pilha A</u> – 21,7; <u>Pilha B</u> - sem variação;</p> <p><b>Análises Biológicas:</b> Condições desfavoráveis para a pilha B.</p> <p><b>Toxicidade:</b> <u>Pilha A</u> - <math>25 \pm 6\%</math> <u>Pilha B</u> - <math>80 \pm 10\%</math></p>	<p><b><u>Medições:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensores de Temperatura;</li> </ul> <p><b><u>Análises Químicas e Físicas:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Humidade;</li> <li>- pH;</li> <li>- Razão C/N;</li> </ul> <p><b><u>Análises Biológicas:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Atividade Enzimática;</li> <li>- Razão <math>\text{CO}_2\text{:C}</math>;</li> <li>- Toxicidade;</li> <li>- Xylanase;</li> <li>- Protease;</li> <li>- Urease;</li> </ul>	Industrial $8,3 \text{ m}^3/\text{dia}$



Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[65]	Dois agentes estruturantes: BA <sub>1</sub> - resíduos verdes reciclados a partir de uma lama comercial de uma unidade de compostagem BA <sub>2</sub> - paletes de madeira esmagadas. - misturas compostas de BA <sub>1</sub> e BA <sub>2</sub> foram chamados M1 e M2, respetivamente; - Razão Lama/ agente estruturante de 1/6 para M1 e M2.	3 reatores piloto com: -0,3 m <sup>3</sup> ; - câmara de aço inoxidável; - cilíndrico; - diâmetro interior de 0,7 m; - comprimento de 0,8 m; - camada de 50 mm de poliuretano para diminuir perdas de calor.	<u>Arejamento:</u> ventilador de ar: introdução de ar através do fundo do reator (taxa contínua de 550 L/h) <u>Revolvimento:</u> Início da 3ª semana, nos 3 reatores;	<b>Matéria Orgânica:</b> BA <sub>1</sub> >M1>Lama; BA <sub>2</sub> >M2>Lama <b>Necessidade química de oxigénio:</b> Lama> BA <sub>1</sub> >M1; Lama> BA <sub>2</sub> >M2 <b>Carbono Total:</b> BA <sub>1</sub> >Lama>M1; M2>Lama> BA <sub>2</sub> <b>Azoto total Kjeldhal:</b> Lama>M1> BA <sub>1</sub> ; Lama>M2> BA <sub>2</sub> <b>Temperatura:</b> M1>M2 <b>Taxa de captação de O<sub>2</sub>:</b> Muito variável mas M1>M2; <b>Consolidação (diminuição da profundidade):</b> M1 – perdas entre 0,4 e 15 %; M2 - perdas entre 0 e 7,9 %; Capacidade absorção de água: M2> M1	<u>Medições:</u> - Distribuição do fluxo de ar - Perda de massa - Temperatura; - Humidade relativa; - Profundidade do composto no interior do reator - Concentração de O <sub>2</sub> no fluxo de ar à entrada e à saída - Percurso do fluxo de ar <u>Análises Químicas:</u> - Matéria seca; - Matéria Orgânica; - Carbono Total; - Carência química de oxigénio (CQO); - Azoto total Kjeldhal;	Laboratorial 0,031 m <sup>3</sup> /dia
[66]	Material Orgânico Municipal (MOW) <b>Misturas:</b> - MOW com/sem adição de raspas de madeira (triturado ou não) - MOW + biossólidos (razão MOW: Biossólidos de 2:1 ou 3:1)	<u>Compostagem:</u> - Pilhas estáticas com 3 m <sup>3</sup> ; <u>Vermicompostagem:</u> - Camas com minhocas ( <i>Eisenia fetida</i> ); Pré-tratamento da vermicompostagem - Material com 45 dias de fase termofílica;	Junção das várias misturas com solo sem plantação ao fim de 16 semanas numa razão de 40g/kg; <u>Tratamento do fertilizante Inorgânico:</u> - Taxa de aplicação de ureia e fosfato diamónio (120 mg N/kg e 35 mg P/kg). - 1,0 g de sementes de relva colocadas em cada pote;	MOW + biossólidos foi sempre mais vantajoso relativamente à utilização de composto tradicional; Nos MOW o comportamento variou sendo que sempre que se junta aparas de madeira, a sua utilização não compensa em relação ao uso de composto tradicional devido à imobilização de nutrientes; O 3:1 V e o 3:1 CB podem até complementar ou substituir o uso de fertilizantes inorgânicos.	<u>Análises Químicas:</u> - Azoto total; - Fósforo Total; - Matéria Orgânica - Razão C/N; - Potencial da rede de Mineralização (N <sub>min</sub> ); - Potencial acumulado da rede de Mineralização - Extração/libertação de fósforo acumulado (P <sub>ac</sub> );	0,28 m <sup>3</sup> /dia

Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[64]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lamas;</li> <li>- Estrume de Porco</li> <li>- Mistura porosa de sólidos inorgânicos (cal e zeólito) foi usado como agente estruturante:</li> </ul> <p>Humidade - 2,7%; Saturação de humidade - 65,7% - Misturada com material absorvente com humidade de 1%.</p>	<p>5 pilhas estáticas com arejamento forçado com 1,2m×1,5m×1,7m. Algum do composto maturado foi usado para a cobertura ( Humidade - 23% m/m; Compostos voláteis - 28%).</p>	<p>A lama digerida foi seca durante 3 dias ao sol. Da 1ª à 4ª pilha, mistura com diferentes proporções de Lamas e agente estruturante. Só na 4ª pilha foi adicionado material absorvente. Só na 5ª pilha é que foi adicionado estrume de porco.</p>	<p><b>Condições iniciais:</b> <u>Lama:</u> Humidade - 78%; Densidade - 940 kg/m<sup>3</sup>; Substancias voláteis - 54%; <u>Estrume de porco:</u> Humidade - 67%; Densidade - 710 kg/m<sup>3</sup>; Substâncias voláteis - 58%; <b>Condições finais:</b> <b>T<sub>max</sub> = 65 °C (exceto na 5ª pilha em que foi 54 °C )</b></p>	3 Sensores de temperatura	Média 0,128 m <sup>3</sup> /dia
[67]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lama aerobicamente digerida (SS); - Resíduos provenientes do varrimento do pátio de triagem do composto (R)</li> </ul> <p><b>4 agentes estruturantes:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aparas de jardim frescas (Fyt);</li> <li>- Aparas de jardim de origem semelhante, armazenadas durante 3 semanas em pilhas (Syt).</li> <li>- paletes de madeira triturada (P); - Casca de árvore de folha caduca (B).</li> </ul>	<p>Pilha trapezoidal: comprimento: 30 m; Altura: 2,5 m; base 1 = 6 m; base 2 = 4 m;</p>	<p><u>4 primeiras misturas:</u> I1 =13% SS+49% R+37% Fyt I2=13% SS+46% R+41% Syt I3=13% SS+47% R+20% Syt+21% P I3=14% SS+48% R+22% Syt+16% B -6 semanas com arejamento forçado e revolvimento em zona coberta (EA); - 26 semanas, após seleção das partículas 20 mm (S), foram armazenados sem arejamento nem revolvimento (EC);</p>	<p>Variação da MO significativa ao longo do processo., mas a seleção do composto homogeneizou a MO nas várias misturas; - Na seleção do material foram verificadas perdas de azoto (volatilização) - A concentração de N-NO<sub>3</sub> aumentou na I3 (melhores condições de nitrificação); - A grande mineralização do azoto orgânico não foi encontrada, (diluição pela imobilização de azoto no agente estruturante).</p>	<p><u>Medições e Análises:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Azoto Mineral (colorimetria);</li> <li>- Carbono Orgânico Total;</li> <li>- Fração solúvel;</li> <li>- Distribuição de azoto e carbono;</li> <li>- Fração de Matéria Orgânica (MO);</li> </ul>	Industrial 2,14 m <sup>3</sup> /dia

Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[68]	Lamas e palha (como estruturante) misturadas numa proporção em massa de 5:1.	Reator cilíndrico (em coluna) de compostagem em escala piloto: - Razão entre a Área superficial e o volume de 11,2 - secção de 1,9 m de altura - 0,6 mm de diâmetro externo nominal; - 0,014 m espessura de parede de polimetilmetacrilato (PMMA); - diâmetro interior nominal da coluna 0,572 m.	- placa de PMMA perfurada colocada 300 mm acima da base da coluna - camada de 30 mm de espessura de polietileno envolvida em torno da parede e sobre a tampa, no topo (isolamento de calor)  <b>Iniciais:</b> <u>Lama:</u> Massa – 64,83 kg Humidade – 81,29 % Massa seca – 12,13 kg Sólidos voláteis – 70,40 % <u>Palha:</u> Massa – 12,86 kg Humidade – 6,09 % Massa seca – 12,08 kg Sólidos voláteis – 96 %	<b>Iniciais:</b> <u>Mistura:</u> Massa – 77,69 kg Volume – 0,31 m <sup>3</sup> Peso a granel – 250,61 kg/m <sup>3</sup> Humidade – 68,85 % Massa seca – 24,21 kg Sólidos voláteis – 83,17% <b>Finais:</b> <u>Composto:</u> Massa – 57,93 kg Volume – 0,22 m <sup>3</sup> Peso a granel – 263,32 kg/m <sup>3</sup> Humidade – 62,70 % Massa seca – 21,60 kg Sólidos voláteis – 76,24 %	Medições: - Temperatura (sensores) - Fluxo de ar (medidor com alcance de 0 - 16 m <sup>3</sup> /h); - Registo da temperatura e fluxo de ar, minuto a minuto;	Piloto 0,03 m <sup>3</sup> /dia

Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[72]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lixo Doméstico (HW)</li> <li>- Resíduos Alimentares (FW)</li> <li>- “Sólidos separados de porco” (SPS)</li> <li>- Lama de matadouro de porcos (PSS)</li> <li>- Algas Verdes (GA)</li> <li>- Raspas de Madeira (WC)</li> </ul>	<p>3 reatores de câmara cilíndrica volume 300L; H = 80 cm; D = 70 cm.</p> <p>- 10 cm de uma camada de poliuretano para diminuir perdas de calor.</p> <p>Pré-processamento:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- moagem;</li> <li>- secagem;</li> </ul>	<p>- Material de compostagem foi colocado sobre uma grade de aço inoxidável com 8 mm de malha quadrada.</p> <p>- O arejamento foi realizado sob a grade e atravessou o material de compostagem.</p> <p>- Torneira de recolha de lixiviados colocada na parte inferior do reator.</p> <p>- Parte superior do reator com tampa de aço inoxidável em forma de cone equipada com uma calha permitindo recolha de condensados.</p> <p>- Revolvimento do composto requer esvaziamento do reator, mistura do composto e novo enchimento do reator.</p>	<p><b>HW + WC:</b> C/N: 80,7; MO aumentou Carbono Total aumentou CQO diminuiu NK aumentou NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/NH<sub>3</sub> aumentou</p> <p><b>SPS:</b> C/N: 12,3; MO diminuiu Carbono Total diminuiu CQO diminuiu NK aumentou NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/NH<sub>3</sub> diminuiu</p> <p><b>FW + WC:</b> C/N: 46,6; MO aumentou Carbono. Total diminuiu CQO diminuiu NK diminuiu</p> <p><b>PSS + WC:</b> C/N: 429; MO diminuiu Carbono Total diminuiu CQO diminuiu NK diminuiu NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/NH<sub>3</sub> manteve-se</p> <p><b>GA + WC:</b> C/N: 374,5; MO diminuiu Carbono Total diminuiu CQO diminuiu NK diminuiu NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/NH<sub>3</sub> aumentou</p>	<p>Medições:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fluxo de ar;</li> <li>- Pressão;</li> <li>- Humidade;</li> <li>- Temperatura;</li> </ul> <p>Análises:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dióxido de Carbono;</li> <li>- Metano;</li> <li>- Óxido Nítrico;</li> <li>- Carbono total (TC);</li> <li>- Carência química de oxigénio (CQO);</li> <li>- Azoto Kjeldahl (NK);</li> <li>- Azoto amoniacal total;</li> <li>- Nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>);</li> <li>- Nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</li> </ul>	Laboratorial/ piloto

Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[70]	<p><b>S1</b> - resíduos domésticos orgânicos (ROD), resíduos de café e de agulhas de pinheiro e aparas de madeira na proporção 01:01:01;</p> <p><b>S2</b> - ROD, aparas de jardim e de vegetais frescos 2:1:1;</p> <p><b>S3</b> - aparas de jardim, resíduos de café e restos de levedura da produção de cerveja 01:01:01;</p> <p><b>S4</b> - aparas de jardim, resíduos de café, restos de vegetais frescos e lama 4:2:2.5:0.25.</p>	<p>Compostores plásticos de 200 L c/ aberturas laterais para arejamento, porta inferior para recolher composto e tampa para a verificação do processo e adição de substrato fresco.</p> <p><u>Tratamentos preliminares:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- secagem ao ar;</li> <li>- trituração num almofariz de cerâmica;</li> <li>- armazenamento em recipiente de plástico no frigorífico.</li> </ul>	<p>Humidade mantida a 60%</p> <p><u>Arejamento:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Revolvimento manual;</li> <li>- 2 em 2 dias;</li> </ul>	<p><b>Temperatura:</b> - aumentou nos 1<sup>os</sup> dias para 60 °C (fase termofílica);</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Descida da temperatura na fase mesofílica;</li> <li>- T<sub>ambiente</sub> atingida aos 90 dias;</li> </ul> <p><b>Razão C/N:</b> Inicial – 25 - 30;</p> <p>Final – 15;</p> <p><b>pH:</b> início – ligeiramente ácido 5,5; (exceto S2 com 7,6)</p> <p>Final – Alcalino (± 9,7 exceto S1 com 8,55);</p> <p><b>Teor de cinzas:</b> Inicial – baixos;</p> <p>Final – aumento acentuado;</p> <p><b>Condutividade:</b></p> <p><u>S1:</u> 1,7 para 1; <u>S2:</u> 1,2 para 1,3;</p> <p><u>S3:</u> 1,7 para 0,5; <u>S4:</u> 6,3 para 9,72;</p>	<p><u>Medições:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensores de temperatura</li> <li>- Humidade;</li> </ul> <p><u>Análises químicas:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Azoto total;</li> <li>- pH;</li> <li>- Condutividade;</li> <li>- Razão C/N;</li> <li>- Carbono orgânico;</li> </ul>	<p>Pequena/ Doméstica</p> <p>0,009 m<sup>3</sup>/dia</p>

Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[81]	- Material estruturante – palha (1); - Lama de ETAR (5); - Razão 1:5;	Testadas 5 diferentes combinações Primeira fase – 7 a 21 dias – biorreator; Segunda fase - 10 a 12 semanas - maturação em pilha com revolvimento; <b>3 reatores rotativos:</b> - em paralelo - capacidade unitária de 125 m <sup>3</sup> ; - alimentados por parafusos sem fim; <b>Pilha:</b> - 4 m <sup>3</sup> ; - Termicamente isoladas;	Tempo no reator: C1 – 7 dias; C2 – 10 dias; C3 – 14 dias; C4 – 18 dias; C5 – 21 dias;  Tempo na pilha: - 142 dias para todos;	- Temperatura máxima atingida (série II): C1 – dias 9, 10 e 11 – 70 °C; C2 – dia 12 – 75 °C; C3 – dia 10 – 61 °C; C4 – dia 15 – 63 °C; C5 – dia 15 – 63 °C; - Equilíbrio na T <sub>amb</sub> (série I, II e III): C1 – dia 57, 40, 35; C2 – dia 57, 38, 34; C3 – dia 56, 37, 34; C4 – dia 50, 47, 39; C5 – dia 28, 50, 27; - Matéria orgânica diminuiu; Tempo de Maturação: C1 – 86 dias – 12 dias para C2 C2 – 74 dias – 14 dias para C3 C3 – 60 dias – 24 dias para C4 C4 – 46 dias – 10 dias para C5 C5 – 36 dias	Medições e Análises: - Temperatura; - Humidade; - Matéria Orgânica; - Carência Química de Oxigénio (CQO); - Azoto total; - Fósforo total; - N- NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ; - N-NO <sub>3</sub> ; - Carência Bioquímica de oxigénio (CBO); - Carbono total; - Ácidos húmicos;	Média Melhor: 10,42 m <sup>3</sup> /dia Pior: 4,36 m <sup>3</sup> /dia

Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[87]	Mistura: - Resíduos alimentares; - Resíduos verdes; Agente estruturante - Casca de arroz	- Reator de 120 L - Aço inoxidável - Cilíndrico - 60 cm de comprimento; - 50 cm de diâmetro; - Com agitador espiral de folha; - Com arejamento – 10 L/min; <u>Tratamentos Preliminares:</u> Trituração até cerca de 5 mm.	Gama de valores selecionados: - Teores de humidade - 45-75%; - Razão C / N - 13,9-19,6; (A) Humidade 60%, C/N 16,2; (B) Humidade 60%, C/N 19,6; (C) Humidade 75%, C/N 16,2; (D) Humidade 45%, C/N 16,2; (E) Humidade 70,61%, C/N 14,5.	A, B e D: - Humidade diminui; - TOCW diminuiu; C e E: - Humidade manteve-se; - TOCW diminuiu; A: - pH subiu 6,5 para 9; - TKNW subiu muito; - Elevada diminuição de sólidos voláteis; B: - pH subiu 4 para 9; - TKNW manteve-se baixa; - Elevada diminuição de sólidos voláteis; - Passou nos testes de germinação; C: - pH manteve-se; - TKNW subiu ligeiramente; D: - pH subiu 6,5 para 9; - TKNW manteve-se baixa; E: - pH desceu 4,5 para 4;	<u>Medições:</u> - Temperatura;  <u>Análises:</u> - Metais pesados; - Humidade; - pH - Temperatura; - Teor em sólidos voláteis; - Carbono orgânico total solúvel em água (TOCW); - Azoto total Kjeldahl solúvel em água (TKNW).	Laboratorial 0,01 m <sup>3</sup> /dia

Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[76]	<p>Resíduos alimentares; 2 fluxos de resíduos a granel: - resíduos verdes; - resíduos de papel picado. Misturas: G - resíduos verdes; GF – 2,8 ton resíduos verdes e 1,2 ton resíduos de alimentos; GFP – 2 ton resíduos verdes, 1,6 ton resíduos de alimentos e 0,4 ton resíduos de papel.</p>	<p>Reator: - Alimentador; - Bomba de enchimento;</p>	<p>- taxa de enchimento de 3m<sup>3</sup>/min; - com arejamento (137 L/min);</p>	<p>- 112 dias de compostagem; G, GF e GFP: - pH subiu de 5 para 8; G: - Razão C/N manteve-se; - Nitratos mantiveram-se; - Amônia manteve-se; - T<sub>max</sub> 61 °C; GF: - Razão C/N diminuiu; - Nitratos aumentaram; - Amônia diminuiu; - T<sub>max</sub> 56 °C; GFP: - Razão C/N diminuiu; - Nitratos aumentaram; - Amônia diminuiu; - T<sub>max</sub> 61 °C;</p>	<p>- Humidade; - Matéria Orgânica; - pH; - Condutividade Elétrica; - Metais Pesados; - Azoto; - Amônia;</p>	<p>Industrial 4320 m<sup>3</sup>/dia</p>



Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[74]	BW – resíduos alimentares; AS – lamas degradadas aerobiamente de ETAR; AnS - lamas degradadas anaerobiamente de ETAR. Agente estruturante: - sphagnum peat; - Razão 1+1 (v/v). (lamas desidratadas)	3 compostores isolados com tampa - 220 L; - com sistemas de recolha de lixiviado. - Arejamento passivo através de um sistema de orifícios e baseado na diferença de pressão do ar interior/exterior.	Mistura: - Manual; - uma vez de 2 em duas semanas durante as 1as 12 semanas e na semana 16, 24 e 63;	- 63 semanas de compostagem; T <sub>max</sub> atingida: - BW – 63 °C; - AnS – 57 °C; - AS – 44 °C; pH: - Flutuante entre 4 e 5,5, exceto nas primeiras 8 semanas em que todos atingiram um pico mais alto (+/- 8); BW: - Condutividade mais elevada; - Matéria seca - 25 – 40%; - Conteúdo em cinzas - 12%; - Matéria orgânica -39%; - Razão C/N – diminui para 13; AS: - Matéria seca - 15% - 30%; (valor baixo) - Conteúdo em cinzas - 4%; - Matéria orgânica -8%; - Razão C/N – aumenta para 20; AnS: - Matéria seca - 15% - 30%; (valor baixo) - Conteúdo em cinzas - 17%; - Matéria orgânica -56%; - Razão C/N – manteve-se para 16;	Medições: - Temperatura; - Concentração de gases; Análises: - pH; - Condutividade; - Matéria seca; - Amónia; - Azoto; - Conteúdo em cinzas; - Taxa de mineralização da matéria orgânica; - Concentração de macro e micro elementos; - Metais pesados; - Azoto; - Carbono; - Toxicidade;	Laboratorial 0,0015 m <sup>3</sup> /dia

Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[71]	HW - resíduos de horticultura; SS - lama; MSW - resíduos sólidos urbanos. Agente estruturante: - Casca de amêndoa moída;	Pilhas: - 1,5 m <sup>3</sup> ; - 1,5 m de comprimento; - 1 m de largura; - 1 m altura;	Razão C/N: 25 <u>Pilha HW:</u> - HW 75%; - casca de amêndoa moída 25%; <u>Pilha SS:</u> - SS 37,5%; - HW 37,5%; - Casca de amêndoa moída 25%; Arejamento forçado: - 7,5 a 9,0 L/kg a cada 4 h; - Revolvimento quinzenal; - Rega nos dias de revolvimento (manter a humidade);	Humidade inicial – 40 a 50 %; - a natureza da matéria-prima determina a evolução do processo de compostagem; - As principais diferenças tanto em relação à populações microbianas e atividades enzimáticas foram observados quando para os MSW - Resultados mais homogêneos encontrados nas pilhas de SS e HW para estes dois parâmetros. - SS e HW permitem processos mais ativos do que a dos MSW, apesar de as populações microbianas no produto final serem mais elevadas no segundo. - Os parâmetros biológicos fornecem informações valiosas para monitorizar a evolução do processo, embora a diversidade de condições e materiais tornasse difícil estabelecer valores de limites para definir a estabilidade do composto.  <b>SS: Início – Final</b> C/N: 23,23 – 12,23 pH: 8,46 – 7,89 <b>HW:</b> C/N: 25,33 – 10,98 pH: 7,92 – 8,85 <b>MSW:</b> C/N: 22,28 – 11,86 pH: 4,7 – 8,47	- Temperatura; - Razão C/N; - pH; - Carbono orgânico Total (TOC);	Para SS e HW: 0,008 m <sup>3</sup> /dia  Para MSW: 0,012 m <sup>3</sup> /dia

Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[84]	Estrume de porco	3 pilhas: - teor de humidade ajustado Forma triangular, - 2 m de largura; - 1,5 m altura; - peso total de cada pilha 2000 kg.	Arejamento: - Revolvimento duas vezes por semana (todas as segundas-feiras e quintas-feiras) – Camião de carregador frontal - Rega de cada pilha nos dias 15, 32 e 63 para ajuste do teor de humidade.  Teor de Humidade inicial: Pilha A - 50% Pilha B - 60% Pilha C - 70%	Temperatura: <u>Pilhas A e B:</u> – Entre 64 e 69 °C dia 4 a dia 21; – Entre 50 e 55 °C dia 26 a dia 57; - Cerca de 30 °C (temperatura ambiente) dia 60 a dia 91; <u>Pilha C</u> - 58 °C dia 10; - 40 a 50 °C dia 30 a dia; - 40 °C de dia 70 a dia 91; <u>Azoto Total:</u> Inicial - 20,10 e 22,50 g/kg Final - 24,80 e 26,00 kg/g - Diminuição no teor de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ conduziu a um aumento na $(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$ ; - Queda de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ na pilha C foi mais rápida que nas pilhas A e B, mas a sua $(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$ . - O $(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)\text{-N}$ na pilha C manteve-se estável durante as 2 últimas semanas de compostagem enquanto um aumento contínuo foi observado nas outras duas pilhas. - <u>pH</u> diminuiu de [8 a 9] para [5 a 6];	Medições: - Temperatura; Análises: - Humidade; - pH; - Potássio;	0,052 m <sup>3</sup> /dia

Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[86]	<p>Experiência I:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Lama animal;</li> <li>- Resíduos de relva fresca;</li> <li>- 1:1</li> </ul> <p>Experiência II:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Estrume de porco;</li> <li>- Resíduos de relva fresca;</li> <li>- Material lascado;</li> <li>- 1:2:1</li> </ul>	<p>Experiência I:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cobertura de Top Tex + sem cobertura;</li> <li>2 pilhas:</li> <li>- forma triangular;</li> <li>- 18 m<sup>3</sup>;</li> </ul> <p>Experiência II:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- cobertura polietileno impermeável preto + cobertura de Top Tex;</li> <li>2 pilhas:</li> <li>- forma triangular;</li> <li>- 14 m<sup>3</sup>;</li> </ul>	<p><u>Experiência I:</u></p> <p>Pilha 1: Densidade - 482 kg/m<sup>3</sup>; Humidade - 70.5%; Razão C:N - 35:1;</p> <p>Pilha 2: Densidade - 592 kg.m3 Humidade - 89.6%. Razão C:N - 35:1;</p> <p><u>Experiência II:</u></p> <p>Pilha 3: Densidade - 268 kg/m<sup>3</sup>; Humidade – 70 %; Razão C:N - 25:1;</p> <p>Pilha 4: Densidade - 337 kg/m<sup>3</sup> Humidade – 75 %. Razão C:N - 27:1; - 5 revolvimentos;</p>	<p>Experiência I:</p> <p>Pilha 1:</p> <p>Parte coberta: T<sub>max</sub> – 56 °C; Parte descoberta: T<sub>max</sub> – 55 °C;</p> <p>Pilha 2:</p> <p>Parte coberta: T<sub>max</sub> – 57 °C; Parte descoberta: T<sub>max</sub> – 56 °C;</p> <p>Experiência II:</p> <p>Pilha 3:</p> <p>Parte top tex: T<sub>max</sub> – 61,5 °C; Parte polietileno: T<sub>max</sub> – 67 °C;</p> <p>Pilha 4:</p> <p>Parte top Tex: T<sub>max</sub> – 59 °C; Parte polietileno: T<sub>max</sub> – 67,5 °C;</p>	<p>- Temperatura;</p> <p>- Oxigénio;</p>	Grande

Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[20]	- Dejetos de animais; - Palha - 1:1	Pilha: - 3 x 2 x 2 (m);	Revolvimento: - semanal; - pá frontal de um trator agrícola;  - 72 dias de compostagem;	<b>T<sub>max</sub></b> – 69 °C no dia 44; <b>Mat. seca</b> – 97,1 para 96,3 % <b>Mat orgânica:</b> - calculada – 78,9 para 57,8 %; - oxidada – 62,4 para 43,6 %; <b>Carbono</b> – 45,8 para 33,5 % <b>Azoto Total</b> – 1,69 para 1,93 % <b>Ácido fosfórico</b> – 0,75 para 1,46 % <b>Razão C/N</b> – 27,1 para 17,3 % <b>pH<sub>seco</sub></b> – 8 para 7,7 <b>pH<sub>húmido</sub></b> – 8,3 para 8,3 <b>Subs. húmicas</b> – 1,3 para 2,5 % <b>Celulose</b> -36,7 para 46,7 % <b>Hemicels</b> – 22,9 para 0,1 % <b>Lenhina</b> - 10,1 para 20,2 % <b>Fósforo</b> – 0,31 para 0,41 %P <b>Potássio</b> – 2,3 para 2,55%K <b>Cálcio</b> – 0,8 para 1,63 %Ca <b>Magnésio.</b> – 0,7 para 2,75 %Mg <b>Ferro</b> – 4260 para 21960 ppm <b>Cobre</b> – 18 para 226 ppm <b>Zinco</b> – 40 para 140 ppm <b>Manganês</b> – 240 para 670 ppm	Temperatura Mat. seca Mat orgânica Carbono Azoto Total Ácido fosfórico Razão C/N pH seco pH húmido Subs. humicas Celulose Hemicels Lenhina Fósforo Potássio Cálcio Magnésio Ferro Cobre Zinco Manganês	Média 0,17 m <sup>3</sup> /dia

Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[20]	- fração orgânica de RSU	Pilhas: - 10 x 4 x 3 (m);	Revolvimento: - 10 em 10 dias; - Retroescavadora;  - 40 dias de compostagem;	$T_{\max}$ – 59 °C no dia 18; Mat. seca – 97,5 para 96,6 % Mat orgânica: - calculada – 51,7 para 51,4 %; - oxidada – 49 para 52,4 %; Carbono – 29,98 para 29,81 % Azoto Total – 1,567 para 1,314 % Ácido fosfórico – 1,677 para 1,72 % Razão C/N – 19,14 para 22,7 % pH seco – 5,9 para 7 pH húmido – 5,4 para 7,7 Subs. húmicas – 0,96 para 1,08 % Celulose – 47,6 para 52,4 % Hemicels – 6,2 para 0,4 % Lenhina - 5,9 para 12,8 % Fósforo – 0,426 para 0,816 %P Potássio – 0,9 para 0,55 %K Cálcio – 2,4 para 3,7 %Ca Magnésio. – 0,25 para 0,255 %Mg Ferro – 9920 para 14000 ppm Cobre – 77 para 2500 ppm Zinco – 230 para 960 ppm Manganês – 130 para 300 ppm	Temperatura Mat. seca Mat orgânica Carbono Azoto Total Ácido fosfórico Razão C/N pH seco pH húmido Subs. húmicas Celulose Hemicels Lenhina Fósforo Potássio Cálcio Magnésio Ferro Cobre Zinco Manganês	Média 3 m <sup>3</sup> /dia

Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[20]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estrume de aviário;</li> <li>- casca de pinheiro;</li> <li>- bagaço de uva</li> <li>- 4:2:4;</li> </ul>	<p>Silos de compostagem - 8 x 4 x 5(m)</p> <p>Previamente triturada e crivada por processos mecânicos.</p>	<p>Revolvimento:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Semanal;</li> <li>- Retroescavadora;</li> <li>- 42 dias de compostagem;</li> </ul>	<p>T<sub>max</sub> – 68 °C nos dias 15 ao 42;  Mat. seca – 97,7 para 97,4 %  Mat orgânica:  - calculada – 80,9 para 76,2 %;  - Oxidada – 64,5 para 62,3 %;  Carbono – 46,99 para 44,196 %  Azoto Total –3,65 para 3,2 %  Ácido fosfórico –2,92 para 3,101 %  Razão C/N – 12,855 para 13,811 %  pH seco – 6 para 6,5  pH húmido – 6,8 para 7  Subs. húmicas – 2,089 para 2,91 %  Celulose – 30,3 para 33,8 %  Hemicels – 7,9 para 9,8 %  Lenhina – 22,1 para 16,4 %  Fósforo – 1,133 para 1,156 %P  Potássio – 1,35 para 2,4 %K  Cálcio – 1,515 para 2,015 %Ca  Magnésio – 0,55 para 0,45 %Mg  Ferro – 3180 para 2240 ppm  Cobre – 75 para 78 ppm  Zinco – 250 para 240 ppm  Manganês – 300 para 230 ppm</p>	<p>Temperatura  Mat. seca  Mat orgânica  Carbono Azoto Total  Ácido fosfórico  Razão C/N  pH seco  pH húmido  Subs. húmicas  Celulose  Hemicels  Lenhina  Fósforo  Potássio  Cálcio  Magnésio  Ferro  Cobre  Zinco  Manganês</p>	<p>Média  0,76 m<sup>3</sup>/dia</p>

Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[20]	- bagaço de uva;	-----	Correção calcária de acidez; - 45 dias de compostagem;	Tmax – 69 °C nos dias 22 e 34; Mat. seca – 97,1 para 97,4 % Mat orgânica: - calculada – 71,8 para 68,4 %; - oxidada – 69,1 para 73,5 %; Carbono – 41,644 para 39,672 % Azoto Total –1,56 para 1,635 % Ácido fosfórico –1,655 para 1,53 % Razão C/N – 26,695 para 24,264 % pH seco – 6,4 para 6,9 pH húmido – 6,3 para 7,1 Subs. húmicas – 0,669 para 1,43 % Celulose – 27,2 para 29,3 % Hemicels – 3,6 para 5,42 % Lenhina – 35,5 para 35,9 % Fósforo – 0,213 para 0,195 %P Potássio – 0,95 para 0,85 %K Cálcio – 3,75 para 3,54 %Ca Magnésio – 0,105 para 0,085 %Mg Ferro – 1810 para 2200 ppm Cobre – 57 para 52 ppm Zinco – 40 para 45 ppm Manganês – 70 para 75 ppm	Temperatura Mat. seca Mat orgânica Carbono Azoto Total Ácido fosfórico Razão C/N pH seco pH húmido Subs. húmicas Celulose Hemicels Lenhina Fósforo Potássio Cálcio Magnésio Ferro Cobre Zinco Manganês	Média



Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
<b>[105] 2010</b>	A - comida de cão; B - farinha de trigo e comida de cão; C - farinha de trigo e resíduos vegetais; D - farinha de trigo e estrume de aves;  - Casca de arroz como agente estruturante;	Reatores de laboratório: - 20 L; - mantidos a 25 °C; - Arejador instalado no fundo do reator; (4 L/min);	A e C - 120 dias; B - 270 dias; D - 240 dias; Humidade: - 50-60 % Medições: - T0 (início); - T1 (dia 25); - T2 (dia 90); - T3 (final);	A – T <sub>max</sub> 55 °C dia 5; • Humidade final 48,4 % B – T <sub>max</sub> 70 °C dia 90; • > % de perdas de MO (86 %) • Humidade final 70,6 % C – T <sub>max</sub> 55 °C dia 5; • > variação de pH • > % de perdas de azoto (98,1%) • Humidade final 12,1 % D – T <sub>max</sub> 70 °C dia 25; • melhor razão C/N final (15,6) • Humidade final 12,3 % pH aumentou condutividade aumentou MO diminuiu Azoto aumentou Razão C/N diminuiu	Medições pH; Condutividade; Humidade; Quantidade de cinza; Carbono total; Azoto total; Matéria orgânica Ácidos húmicos Ácidos fúlvicos;	Laboratorial Melhor: 0,0007 m <sup>3</sup> /dia  Pior: 0,0003 m <sup>3</sup> /dia
<b>[69] 1988</b>	<u>Pilha 1:</u> - Lama (29 %) - Palha (71 %)  <u>Pilha 2:</u> - Lama (45 %) - Serradura (55 %)	<u>Pilha 1:</u> Base – 3,05 m Altura – 1,58 m Comprimento – 39 m Volume – 3,48 m <sup>3</sup>  <u>Pilha 2:</u> Base – 3,05 m Altura – 1,37 m Comprimento – 39 m Volume – 3,03 m <sup>3</sup>	Principal diferença nos constituintes da palha e da serradura são: - Quantidade de Pesticida (> na serradura) - Carbohidratos solúveis (> na palha) - Cobre, Ferro, Níquel e Zinco (> na palha) - Chumbo e Cádmio (> na serradura) - Densidade (> na serradura)	<u>Pilha 1:</u> - Temperatura entre 65 e 70 °C do dia 11 ao dia 25.  <u>Pilha 2:</u> - Temperatura entre 62 e 68 °C do dia 18 ao dia 25.  32 dias de compostagem;	Medições: - Temperatura; - Dimensões Análises: - Sólidos totais; - Sólidos voláteis; - Salmonelas; - Coliformes; - Densidade; - Odor;	0,2 m <sup>3</sup> /dia

Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[75] 1998	<p><b>SC:</b> 46.5% lamas + 53.5% resíduos de algodão;  <b>PCO:</b> 34.6% resíduos de avario + 65.4% resíduos de algodão + 1.93 l/kg água residual da trituração da azeitona;  <b>SCO:</b> 32.1% lamas + 67.9 resíduos de algodão + 0.94 l/kg água residual da trituração da azeitona;  <b>SM:</b> 79.0% lama + 21.0% palha;  <b>SMO:</b> 52.8% lama + 47.2% palha  + 1.76 l/kg água residual da trituração da azeitona;  <b>PPB:</b> 27.0% estrume porco+20.0% resíduos de aviário  +53.0% bagaço de sorgo doce;  <b>RB:</b> 95.0% restos da cidade  +5.0% bagaço de sorgo doce;</p>	1500 kg de cada mistura foi a compostada num sistema de Rutgers de pilha estática.	<p>Temperatura máxima imposta – 55 °C</p> <p>Ventilação:  - duração de 30 segundos;  - de 15 em 15 minutos;  - pela base da pilha;</p> <p>Manutenção da Humidade entre 60 – 75 % de matéria seca;</p>	<p>Final da fase ativa:  - temperatura da pilha estável e próxima da temperatura atmosfera, após 49, 49, 84, 56, 63, 56 e 77 dias de processo nas diferentes misturas, respetivamente.  - Paragem do arejamento durante 2 meses após este dia;</p> <p><b>SCO:</b>  - Todas as fases começam mais tarde que nas outras pilhas;</p> <p><b>SMO:</b>  - Razão C/N mais elevada no final (11,8);</p> <p><b>SC e PCO:</b>  - todas as fases começam mais cedo;</p> <p><b>RB:</b>  - razão C/N mais baixa no final (7,8);</p> <p><b>Índices de maturação:</b>  C/N &lt;12;  C<sub>w</sub> &lt;1,7%;  C<sub>w</sub>/N &lt;0,55;  NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/NO &lt;0,16;  NH<sub>4</sub>-N &lt;0,04%;  índice de germinação superior a 50%;  C<sub>m</sub> &lt; 30%;  C<sub>R</sub> &lt; 7.2%;  C<sub>s</sub> x K<sub>s</sub>&lt;0.35%/dia.</p>	<p>Análises:  - MO;  - Azoto total;  -Carbono Orgânico;  - Solubilidade do Carbono Orgânico;  - Ácidos húmicos carbónicos;  - Ácido fúlvico carbónico;  - Humidade;  - NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N;</p>	Piloto

Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[85]	Mistura: - bagaços de azeitona; - 2-5 % de engaço de uva;	<b>Pilha:</b> - 3m de comprimento; - 2 m de largura; - 0,8 m de altura;	<u>Pilha 1:</u> - Móvel; - Arejamento obtido por volteio da mistura (sachola elétrica de 600 W de potência); <u>Pilha 2:</u> - Estática com arejamento forçado (com temporizador); - Controlo de temperatura;	<u>Pilha 1:</u> – T <sub>máx</sub> 65 °C; - Fase termofílica foi atingida mais rápido; - Fase de arrefecimento mais rápida; - Fase de maturação atingida mais rápido; - Degradação de MO cerca de 57 %; - Razão C/N: de 46 para 17; - Aumento do grau de humificação (estabilização) de 69 % inicial para 94 %; - Degradação total das gorduras; <u>Pilha 2:</u> – T <sub>máx</sub> 54 °C; - Degradação de MO cerca de 53 %; - Razão C/N: de 46 para 18; - Aumento do grau de humificação (estabilização) de 69 % inicial para 83 %; - Degradação total das gorduras; - Não se observaram alterações nos teores em lenhina, celulose e hemicelulose. - Duração do processo: 4-6 meses	- Temperatura; - pH; - Condutividade elétrica; - Humidade; - Sólidos totais; - Carbono e azoto totais; - Compostos fenólicos; - Gorduras; - Razão C/N; - Cinzas; - Índice de germinação; - Salinidade;	Pequena 0,04 m <sup>3</sup> /dia

Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[80]	<p>A:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 70% (v/v) de resíduos de jardim (cortados e podados);</li> <li>- 30% (v/v) lamas de origem urbana ou agroindustrial;</li> </ul> <p>B:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 60% (v/v) de resíduos de jardim (cortados e podada);</li> <li>- 40% (v/v) lamas de origem urbana ou agroindustrial;</li> </ul>	- Compostagem em pilha;	160 dias de compostagem;	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grau de Humidificação (DH);</li> <li>- Razão de Humidificação (HR);</li> <li>- Índice de Humidificação (HI);</li> </ul> <p><b>A:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevada diminuição da humidade (de 67 para 11 %);</li> <li>- pH inicial 7,41; final 7,7;</li> <li>- Condutividade inicial 2,5; final 2;</li> <li>- Cinza inicial 37; final 49;</li> <li>- DH: 40% para 70%; - HR: 20% para 32%;</li> <li>- HI: 1,6 para 0,4;</li> </ul> <p><b>B:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminuição da humidade (de 68 para 48%);</li> <li>- pH inicial 7,17; final 7,79;</li> <li>- Condutividade inicial 3,5; final 1,9;</li> <li>- Cinza inicial 42; final 65;</li> <li>- DH: 40% para 60 %; - HR: 15% para 30%;</li> <li>- HI: 1,4 para 0,6;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cinzas</li> <li>- pH</li> <li>- Condutividade elétrica;</li> <li>- Nutrientes;</li> <li>- Metais pesados;</li> <li>- Solubilidade de carbono e azoto em água;</li> </ul>	Média
[89]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 500 g estrume de vaca</li> <li>- 500 g de palha</li> <li>- 900 g efluente de curtume</li> </ul>	Contentor cilíndrico (20 dm <sup>3</sup> )	<p>Humidade ajustada a 50 %;</p> <p>Revolvimento:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Duas vezes por semana;</li> <li>- os tambores foram abertos, o composto foi manualmente misturado;</li> <li>- adição de água destilada quando necessário para manter Humidade de 50%;</li> </ul>	<p><b>Início / fim</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- pH: 9,1/8,5;</li> <li>- Azoto total: 11/27;</li> <li>- Carbono total: 340/200;</li> <li>- <u>Razão C/N: 31:1 / 7:1;</u></li> <li>- Hemicelulose: 132/76;</li> <li>- Celulose: 314/149;</li> <li>- Teor de lignina: 52/62;</li> <li>- Teor de cinza: 49/90;</li> <li>- Fração solúvel: 453/624;</li> <li>- índice de germinação: 48%;</li> <li>- A temperatura não ultrapassou os 40°C;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pH</li> <li>- Humidade;</li> <li>- Carbono orgânico(C);</li> <li>- Azoto total (N),</li> <li>- hemicelulose)</li> <li>- Lenhina</li> <li>- Fração solúvel;</li> </ul>	Pequena 0,0013 m <sup>3</sup> /dia

Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[90]	SC – lama + serradura + cascas de árvores; UC - resíduos urbanos PC1, PC2 – resíduos de aviário 2 DC - compostos domésticos (com resíduos domésticos) utilizando compostagem térmica; VC – vermicompostagem;	SC - recomendado como remediador de solo, para jardinagem e agricultura; UC – usado em vinhas e pomares; PC1- resíduos de aviário com cinzas e “carcase meal”; PC2 - resíduos de aviário com serradura; - Recomendado para uso em vinhas, pomares e olivais; DC – 1 m <sup>3</sup> ; VC - <i>Eisenia foetida</i>		<b>SC:</b> - T <sub>max</sub> – 30 °C - GI = 67% - Elevada quantidade de coliformes e presença de coliformes fecais; <b>UC:</b> - único que tem o pH dentro da gama desejada (5,5 – 8,5); - Elevada condutividade; - T <sub>max</sub> – 30 °C; <b>PC1:</b> - Carbono mais baixo (23,4 %); - Mais baixa razão C/N – 9,2; - Elevada condutividade; - T <sub>max</sub> – 49 °C - GI – 0; <b>PC2:</b> - Quantidade > de Azoto (3,8 %) - Quantidade > de NH <sub>4</sub> -N (8,3 g/kg); - o elevado pH e a elevada quantidade de NH <sub>4</sub> -N pode ter levado a formação de níveis tóxicos de amónia (NH <sub>3</sub> ); - Elevada condutividade; - T <sub>max</sub> – 30 °C - GI – 0; <b>VC:</b> - Matéria seca < 25% (valor mínimo permitido); - Matéria orgânica demasiado elevada em todos os compostos; - GI – 1;	- Temperatura; - Humidade; - NH <sub>4</sub> -N; - Matéria Orgânica; - Azoto total; - Carbono Total; - Razão C/N; - Condutividade; - pH; - Metais pesados: Cd; Cr; Cu; Ni; Pb; Zn; - Atividade respiratória passados 4 dias; - Índice de Germinação;	Várias

Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[77]	<u>Misturas Fase 1 e 2:</u> A - resíduos orgânicos domésticos + 14% guardanapo de folha simples(a) B - resíduos orgânicos domésticos + 14% rolo de cozinha (b) C - resíduos orgânicos domésticos + 14% papel Kraft fino (c) D - resíduos orgânicos domésticos; <u>Misturas Fase 3:</u> A - 43 % (a); C - 43 % (c); B - 15 % saco de plástico biodegradável;	4 Reatores - Cilíndricos; - em aço inox 316; - parede dupla; - bainha de 3 mm de espessura; - Dimensões: 300 mm de altura; 140 mm de diâmetro - volume vazio de 4,62 dm <sup>3</sup> .	Fase 1 – 40 °C Fase 2 – 55 °C Fase 3 – 40-55 °C  Caudal de ar na fase 3 - 0,30 dm <sup>3</sup> /min	A: <u>Fase 1</u> Humidade – 80,21 para 61,37 % pH – 5,35 para 7,01 <u>Fase 2</u> Humidade – 80,21 para 16,58 % pH – 5,35 para 7,04 (melhor caso) <u>Fase 3</u> Humidade – 76,73 para 43,86 % pH – 5,41 para 6,59 B: <u>Fase 1</u> Humidade – 80,7 para 63,13 % pH – 5,61 para 6,96 <u>Fase 2</u> Humidade – 80,7 para 9,23 % pH – 5,61 para 7,07 <u>Fase 3</u> Humidade – 79,33 para 10,87 % pH – 5,49 para 7,02 C: <u>Fase 1</u> Humidade – 80,44 para 48,73 % pH – 5,45 para 7,01 <u>Fase 2</u> Humidade – 80,44 para 17,71 % pH – 5,45 para 7,05 <u>Fase 3</u> Humidade – 78,94 para 12,34 % pH – 5,49 para 6,61 D: <u>Fase 1</u> Humidade – 81,66 para 39,41 % pH – 5,43 para 7,09 <u>Fase 2</u> Humidade – 81,66 para 8,72 % pH – 5,43 para 7,12 <u>Fase 3</u> Humidade – 81,66 para 8,87 % pH – 5,43 para 7,05	- Unidade de controlo térmico; - Analisador de CO <sub>2</sub> ; - Humidade - pH  - CO <sub>2</sub> sempre mais elevado na por volta das 100 horas de processo; - Foram necessários 90 dias de estabilização para que se obtivessem compostos estabilizados (verificação pela razão C/N e pelo Índice de Germinação)	Laboratorial 0,00021 m <sup>3</sup> /dia

Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[73]	Resíduos verdes: - Ramos, folhas, ervas daninhas, e relva cortada;	<p><u>Pilhas “windrow”</u> (pilhas revolvidas) - Cada fileira com secção transversal trapezoidal; - 30 m x 10 m x 3 m de altura; - Massa inicial de 500-1500 t.</p> <p>Membranas usadas deram origem a: F0.22 µm F1 kDa; R1 kDa; R10 kDa; R100 kDa;</p>	<p>- Formação das pilhas numa área cimentada e descoberta; <u>Pré-tratamento:</u> - Os resíduos estiveram alguns dias armazenados antes de serem formadas as pilhas; - Trituração; Revolvimento: - a cada 15-21 dias por um equipamento móvel;</p> <p>Três 1<sup>os</sup> meses: - em caso de humidade insuficiente foi pulverizada água; 6 a 7 meses de compostagem: - produto foi separado usando um crivo rotativo de 10 mm - material subdimensionado – composto; - material de grandes dimensões reciclado para a moagem no início do processo.</p>	<p>- 8 meses de processo; F0.22 µm pH: 8,4 para 8,5; Concentração TOC: 4,5 – 8 gC/L F1 kDa pH: 7,7 para 8,6; R1 kDa pH: 6,7 para 7,5; R10 kDa pH: 6,5 para 7,5; R100 kDa pH: 6,7 para 7,5;</p> <p>Todas as outras: Concentração TOC: 1,5 – 2 gC/L;</p> <p>Concentração de TOC, COD e N orgânico mais elevada sempre em F0.22 µm;</p>	<p>- Ultrafiltração da matéria orgânica (MO) Medições: - Carbono orgânico total (TOC); - Carência química de oxigénio (COD); - azoto orgânico; - Estudo espectroscópico</p>	Grande 3,75 m <sup>3</sup> /dia

Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[78]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lama</li> <li>- Serradura - agente estruturante (Razão 2:1)</li> <li>- Misturas emendados com cinzas volantes de carvão a 0, 10, 25 e 35 % (w / w)</li> </ul>	- Reatores de compostagem à escala de bancada;	Razão C/N mantida a 25 Humidade mantida entre 60 e 70 %; Ventilação quando T>55°C; - 100 dias de compostagem;	<u>Início:</u> Lamas - Cinzas volantes - Serradura pH: 7,45 – 11,4 – 5,55; EC (dS/m): 1,86 - 2,59 - 0,02; Carbono Total (%): 38,5 - 6,31 - 46,5; Azoto total (%): 6,88 – 0,02 – 0,22; Fósforo Total (%) 2,04 - 0,34 - 0,006; Humidade (%): 82,5 – 0,11 – 8,12; C/N inicial: 25 – final: 17 a 19; - O pH em todos os tratamentos aumentada para 90 durante os primeiros 7 dias; - A adição de cinzas volantes> o pH inicial do composto. Com um aumento no nível de cinzas a alteração apresentada devido à elevada alcalinidade das cinzas. - Carbono Orgânico Solúvel diminuiu atingindo valores estáveis aos 63 dias; - Carbono orgânico total diminuiu; - Inibição da degradação dos compostos orgânicos só ocorreu na mistura com 35% de cinzas;	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pH;</li> <li>- Carbono Orgânico Solúvel;</li> <li>- Carbono orgânico total;</li> <li>- NH<sub>4</sub>-N;</li> <li>- PO<sub>4</sub>-P;</li> <li>- NO<sub>3</sub>-N;</li> <li>- Azoto total;</li> </ul>	Laboratorial



Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[88]	<p>- Mistura de lamas e serradura (razão 1:2) com:</p> <p>- controlo – 0 % de cal;</p> <p>- Lime 1 - 0,63 % de cal;</p> <p>- Lime 2 - 1,0% de cal;</p> <p>- Lime 3 - 1,63% de cal (w / w de peso seco);</p>	<p>- 18 kg ± 0,1 kg de cada mistura;</p> <p>- reactores de compostagem;</p>	<p>- Compostagem de 100 dias;</p> <p>- Arejamento contínuo a 1 L / min.</p> <p>- Temperatura máxima de 55 °C;</p> <p>- Sensores de Temperatura que acionam a ventilação aos 55°C.</p> <p>- Humidade mantida entre 60 e 70 %;</p>	<p>Controlo:</p> <p>- Final da fase termofílica: dia 50;</p> <p>- pH inicial/final: 7,3/6,9;</p> <p>- condutividade i/f: 1,6/2,75;</p> <p>Lime 1:</p> <p>- Final da fase termofílica: dia 50;</p> <p>- pH inicial/final: 7,8/6,9;</p> <p>- condutividade i/f: 1,8/2,1;</p> <p>Lime 2:</p> <p>- Final da fase termofílica: dia 57;</p> <p>- pH inicial/final: 8,6/7,0;</p> <p>- condutividade i/f: 1,9/2,0;</p> <p>Lime 3:</p> <p>- Final da fase termofílica: dia 65;</p> <p>- pH inicial/final: 9,2/7,0;</p> <p>- condutividade i/f: 1,9/1,9;</p> <p>- O aumento da adição de cal leva à diminuição do índice de germinação;</p> <p>- O Índice de Germinação de 80% foi obtido entre os 49 e os 100 dias;</p> <p>- A adição de cal causou uma redução significativa na solubilidade em água de Cu, Mn e Zn;</p> <p>- As reduções máximas foram de 60 e 40% para o Cu, 80 e 40% para Mn, 55 e 10% para Zn, e 20 e 25% para Ni, no final do período de compostagem.</p>	<p>Medições:</p> <p>- Temperatura;</p> <p>- pH;</p> <p>- Condutividade;</p> <p>- Carbono orgânico solúvel;</p> <p>Análises:</p> <p>- NH<sub>4</sub>-N;</p> <p>- NO<sub>3</sub>-N;</p> <p>- Azoto orgânico solúvel;</p> <p>- Cu, Mn, Pb, Ni, e Zn;</p>	Laboratorial

Ref.	Matérias-primas	Processo utilizado	Condições	Composto final	Parâmetros Controlados	Escala
[82]	<p>C1:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- lamas urbanas primárias;</li> <li>- folhas de beterraba (resíduo verde).</li> </ul> <p>C2:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- lamas primárias;</li> <li>- estrume de ovelha;</li> <li>- folhas de beterraba (resíduo verde);</li> <li>- palha;</li> </ul>	<p>Biorreator acelerado automatizado:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 3,979 m<sup>3</sup>;</li> <li>- grau de enchimento de 75%;</li> </ul>	<p>Com controlador de agitação, arejamento e de hidratação automático;</p> <p>C1: - 30 dias;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- com agitação e arejamento de 8 em 8 h;</li> </ul> <p>C2: - 23 dias</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- com agitação e arejamento de 6 em 6 h;</li> </ul>	<p><u>C1: (inicial/final)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura: 28/30 °C;</li> <li>- T<sub>max</sub>: 60 °C;</li> <li>- Humidade: 71/35 %;</li> <li>- Oxigénio: 17/21 %;</li> <li>- pH: 7,1/7,3;</li> <li>- Razão C:N: 18/10;</li> <li>- Amónia/Nitratos: 5/0;</li> </ul> <p><u>C2: (inicial/final)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura: 29/29 °C;</li> <li>- T<sub>max</sub>: 60 °C;</li> <li>- Humidade: 59/36 %;</li> <li>- Oxigénio: 18/22 %;</li> <li>- pH: 7,3/7,3;</li> <li>- Razão C:N: 20/12;</li> <li>- Amónia/Nitratos: 9/0;</li> </ul> <p>Pode ser usado na agricultura</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pH;</li> <li>- Temperatura;</li> <li>- Humidade;</li> <li>- Oxigénio;</li> <li>- Carbono Orgânico Total;</li> <li>- Azoto total;</li> <li>- NH<sub>4</sub><sup>+</sup> – N;</li> <li>- NO<sub>3</sub><sup>-</sup> – N;</li> <li>- Fósforo Total;</li> <li>- Potássio Total;</li> <li>- Magnésio;</li> <li>- Cálcio;</li> <li>- Metais Pesados (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn)</li> <li>- Densidade dos coliformes totais e fecais;</li> <li>- Ovos de helminth;</li> </ul>	Grande 0,306 m <sup>3</sup> /dia
[79]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lamas (SS)</li> <li>- Cinzas volantes (FA)</li> <li>- Cal (L)</li> </ul> <p>Misturas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2:1 FA/SS;</li> <li>- 1:2 FA/SS;</li> <li>- 0,5:0,5:2 FA/L/SS;</li> <li>- 1:1 L/SS;</li> <li>- 1:1 FA/SS;</li> </ul>	- Recipientes abertos	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A adição de cinzas volantes e de cal às lamas aumentou o conteúdo total de sólidos de 15% para 50%, enquanto a fração orgânica de sólidos totais diminuiu de 72% para 30 a 50%.</li> <li>- Baixas doses de cinzas volantes devem ser adicionados à lama no sentido de produzir um material com as propriedades adequadas no que diz respeito aos efeitos fitotóxicos e ecotoxicidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Concentração de sólidos totais;</li> <li>- Teor de humidade;</li> <li>- Sólidos voláteis totais (representativos da presença de biomassa);</li> <li>- Total de sólidos não voláteis;</li> <li>- pH;</li> <li>- Fitotoxicidade;</li> <li>- Inibição de germinação;</li> <li>- Crescimento de raiz;</li> <li>- Caracterização da toxicidade do lixiviado;</li> </ul>	

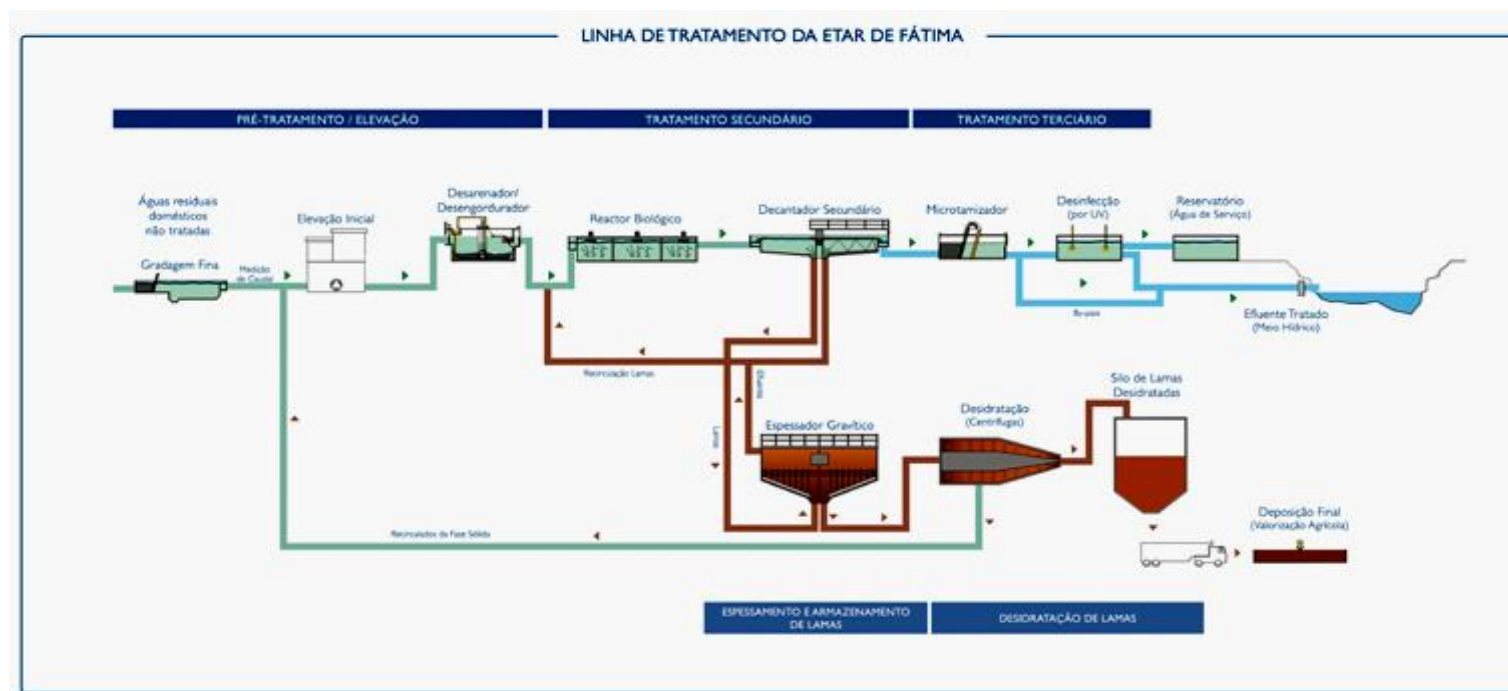
**Anexo VI - DIAGRAMA DA LINHA DE TRATAMENTO DA ETAR DE FÁTIMA**

Figura VI-1 – Diagrama da Linha de Tratamento da ETAR de Fátima <sup>[91]</sup>.

## Anexo VII - SOLUÇÕES PREPARADAS PARA A ANÁLISE DO MERCÚRIO

Soluções preparadas para a análise do Mercúrio:

- i. Solução 50% V/V de ácido nítrico e ácido sulfúrico:

Adicionar lenta e cuidadosamente  $25 \pm 0,5$  mL de ácido sulfúrico ( $d_{20}$  1,84) a  $25 \pm 0,5$  mL de ácido nítrico ( $d_{20}$  1,42). Deixar sair os vapores formados, fechar o frasco e agitar cuidadosamente para homogeneizar e voltar a abrir.

- j. Solução 6% m/V Permanganato de Potássio

Dissolver  $6 \pm 0,1$ g de Permanganato de Potássio em água destilada num *gobelet*, transferir para um balão volumétrico de 100 mL e perfazer com água destilada. Agitar bem antes de usar.

- k. Solução de 20 % de  $\text{HONH}_2 \cdot \text{HCl}$ :

Dissolveu-se  $20,0 \pm 0,5$  g de Cloreto de hidroxilamónio em  $100 \pm 2$  mL água destilada.

- l. Solução “mãe” de mercúrio (solução já se encontrava preparada)

Dissolveu-se 135,4 mg de cloreto de mercúrio em 75 mL de água destilada. Adicionou-se 10 mL de  $\text{HNO}_3$  concentrado e ajustou-se o volume a 100 mL. A solução tem concentração de 1 mL para 1 mg Hg.

- m. Solução padrão de mercúrio (solução já se encontrava preparada)

Diluiu-se 1 mL da solução “mãe” de mercúrio em 1000 mL de água destilada. A solução tem uma concentração de 1 mL para  $1 \mu\text{g}$  Hg.

- n. Soluções padrão:

- *Solução  $5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$* : Colocar 0,5 mL de solução de mercúrio (1ppm) num balão volumétrico e perfazer até 100 mL com água destilada.

- *Solução  $10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$* : Colocar 1 mL de solução de mercúrio (1ppm) num balão volumétrico e perfazer até 100 mL com água destilada.

- *Solução  $20 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$* : Colocar 2 mL de solução de mercúrio (1ppm) num balão volumétrico e perfazer até 100 mL com água destilada.

- *Solução  $30 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$* : Colocar 3 mL de solução de mercúrio (1ppm) num balão volumétrico e perfazer até 100 mL com água destilada.

- o. Solução de Ácido clorídrico 10% (V/V)

Diluiu-se 50 mL de ácido clorídrico concentrado em 500 mL de água destilada.

- p. Solução de Cloreto de Estanho

Dissolveu-se 12,5 g de cloreto de estanho em 250 mL de ácido clorídrico a 5% (V/V).

## Anexo VIII

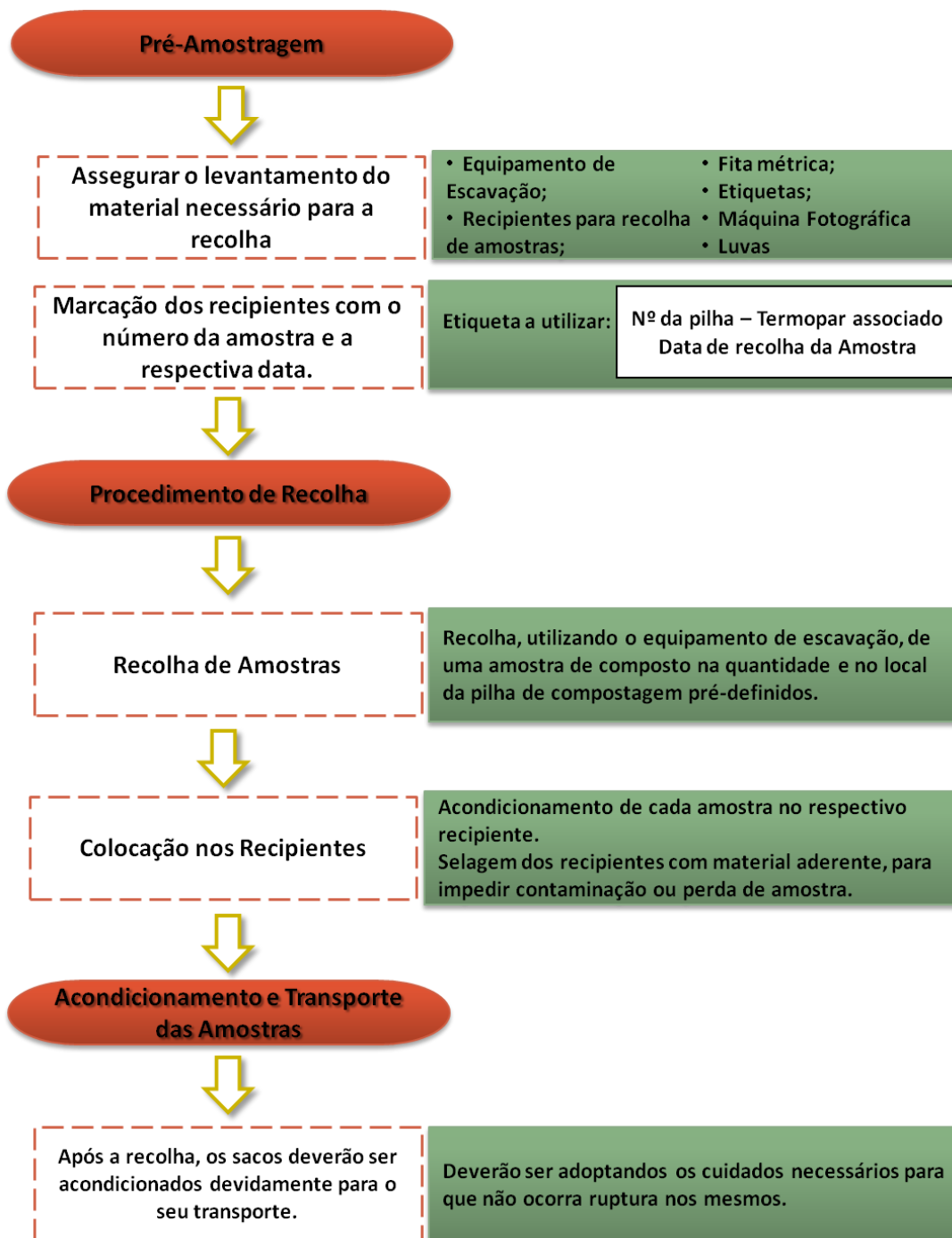


Figura VIII-1 – Procedimento utilizado para a amostragem.

## Anexo IX - RESULTADOS DA ANÁLISE DA HUMIDADE

Tabela IX-1 – Resultados da análise de humidade do dia 20/06/2012.

Humidade								
Amostra	Pilha	Peso da placa (g)	Peso da placa + Composto a* (g)	Peso da placa + Composto b** (g)	Água perdida	Peso do composto	Humidade	Humidade média
1	1a	39,8	70,5	49	21,5	30,7	70,0	69,5
2	1a	38,5	67,5	47,5	20	29	69,0	
3	1b	40,2	73	50,1	22,9	32,8	69,8	70,0
4	1b	39,6	69,5	48,5	21	29,9	70,2	
5	2a	39,4	73,1	50,5	22,6	33,7	67,1	67,5
6	2a	38,8	72,8	49,7	23,1	34	67,9	
7	2b	39,3	68,7	48,9	19,8	29,4	67,3	68,1
8	2b	40,3	74,7	51	23,7	34,4	68,9	
9	3a	21,7	52,4	32,2	20,2	30,7	65,8	66,4
10	3a	13,6	41,7	22,9	18,8	28,1	66,9	
11	3b	12,9	41,5	23	18,5	28,6	64,7	65,4
12	3b	21,2	50,5	31,1	19,4	29,3	66,2	

\*a – antes de secagem

\*\*b- depois da secagem

**Anexo X – RETA DE CALIBRAÇÃO DAS SOLUÇÕES PADRÃO DE MERCÚRIO**

Tabela X-1 – Medição das soluções padrão de Mercúrio.

Soluções padrão	
Concentração (µg/L)	Absorvância
0,0	0,003
5,0	0,021
10,0	0,043
20,0	0,081
30,0	0,123

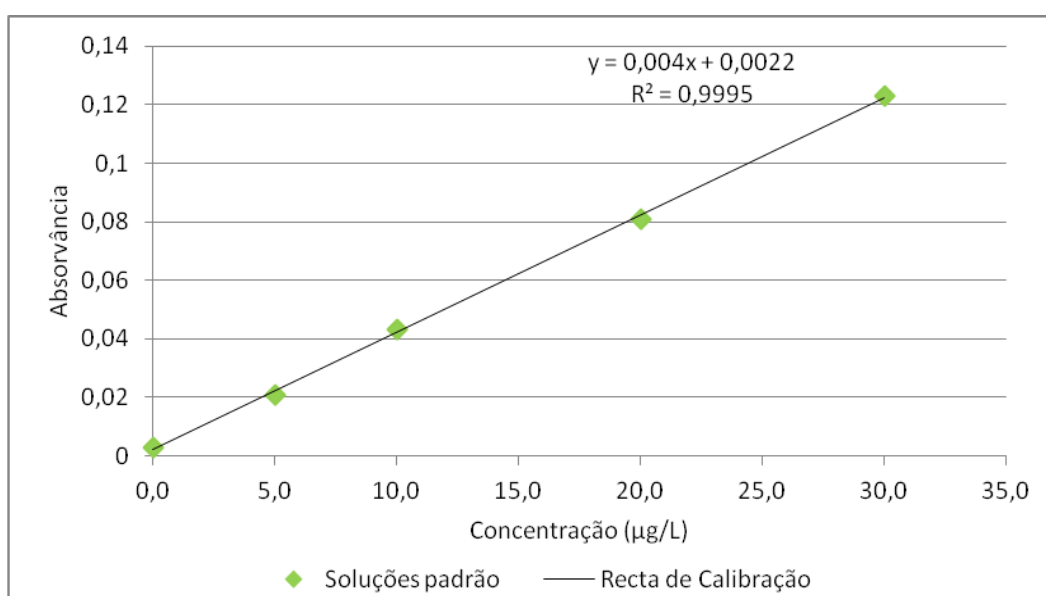


Figura X-1 – Reta de Calibração.

**Anexo XI - PREPARAÇÃO DOS MEIOS PARA ANÁLISE MICROBIOLÓGICA**

Preparação dos meios para análise microbiológica:

- **Lauryl Sulphate Broth (comercial) – 76,2 g/L**

$$\begin{aligned} 1 \text{ l} &\rightarrow 76,2 \frac{\text{g}}{\text{L}} \\ 0,7 \text{ l} &\rightarrow x \frac{\text{g}}{\text{L}} \\ x &= \frac{0,7 \text{ L} \times 76,2 \frac{\text{g}}{\text{L}}}{1 \text{ L}} = 53,34 \text{ g} \end{aligned}$$

- **Agar – 10 g/L**

$$\begin{aligned} 1 \text{ l} &\rightarrow 10 \frac{\text{g}}{\text{L}} \\ 0,7 \text{ l} &\rightarrow x \frac{\text{g}}{\text{L}} \\ x &= \frac{0,7 \text{ L} \times 10 \frac{\text{g}}{\text{L}}}{1 \text{ L}} = 7 \text{ g} \end{aligned}$$

- **Fluorocult (comercial) – 36,1 g/L**

$$\begin{aligned} 1 \text{ L} &\rightarrow 36,1 \frac{\text{g}}{\text{L}} \\ 0,2 \text{ L} &\rightarrow x \frac{\text{g}}{\text{L}} \\ x &= \frac{0,2 \text{ L} \times 36,1 \frac{\text{g}}{\text{L}}}{1 \text{ L}} = 7,22 \text{ g} \end{aligned}$$



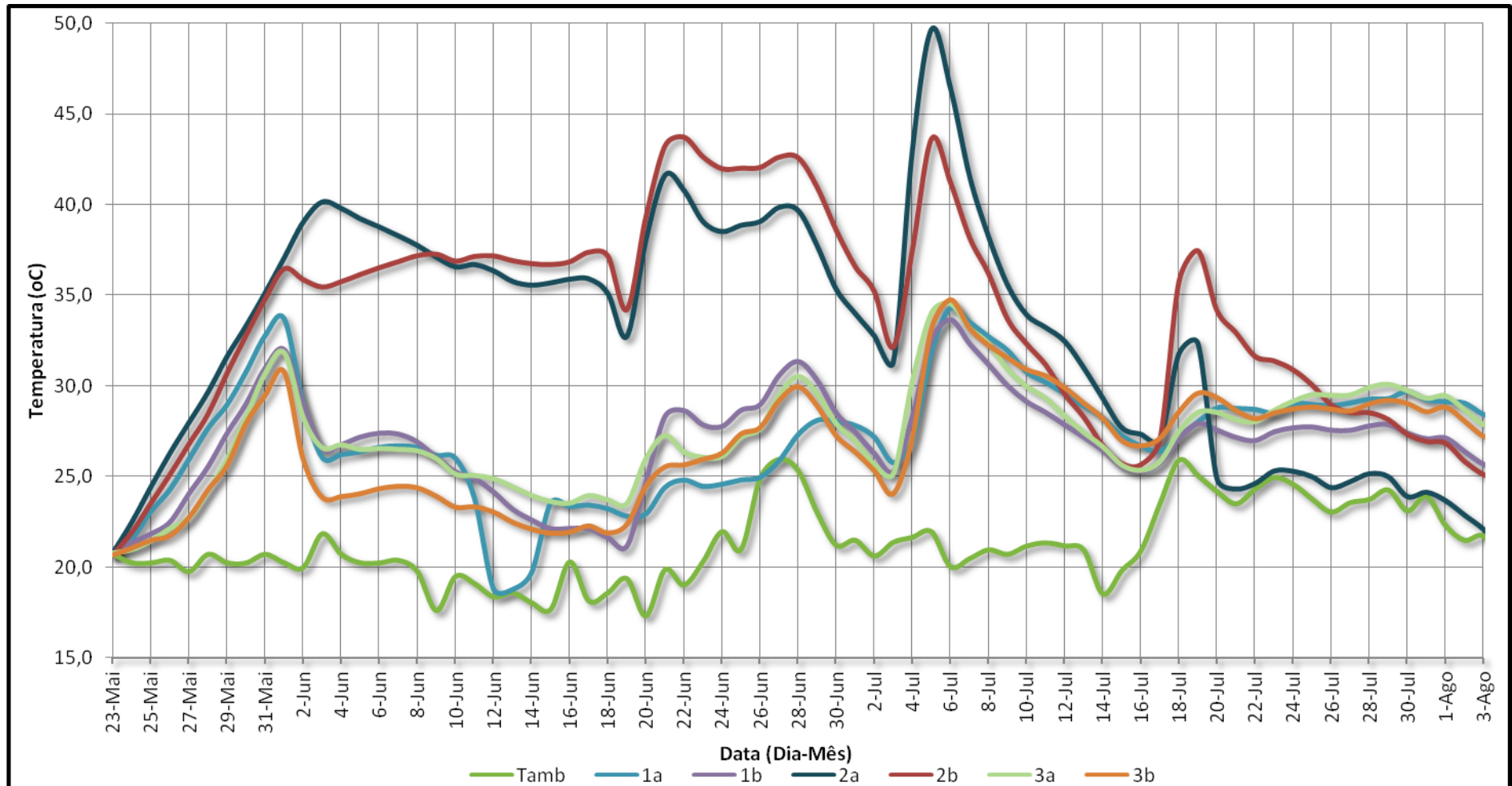
**Anexo XII – VARIAÇÃO DE TEMPERATURA AO LONGO DE TODO O PROCESSO DE COMPOSTAGEM**

Figura XII-1 – Gráfico das temperaturas atingidas durante todo o processo monitorizado, das seis pilhas construídas.

## Anexo XIII - ANÁLISE OBTIDAS POR DIFRAÇÃO RAIO-X



Thermo Fisher Scientific  
900 Middlesex Turnpike  
Billerica, MA 01821

### Certificate of Verification

XL3t-46115

Reading No 1  
Mode SOIL  
Time 2015-08-20 18:26  
Duration 180.00  
Sequence Final  
Flags 8mm  
SAMPLE  
LOCATION  
INSPECTOR  
COR 1  
COR 2  
MISC  
NOTE



	%	±	Error
Mo	0.001	±	0.000
Zr	0.020	±	0.000
Sr	0.014	±	0.000
U	0.001	±	0.000
Rb	0.011	±	0.000
Th	0.002	±	0.000
Pb	0.000	±	0.000
Se	< LOD	:	0.000
As	0.001	±	0.000
Hg	< LOD	:	0.000
Au	< LOD	:	0.000
Zn	0.035	±	0.001
W	< LOD	:	0.002
Cu	0.010	±	0.001
Ni	< LOD	:	0.002
Co	< LOD	:	0.004
Fe	1.152	±	0.008
Mn	0.063	±	0.003
Cr	0.029	±	0.002
V	< LOD	:	0.003
Ti	0.247	±	0.005
Sc	0.010	±	0.005
Ca	6.379	±	0.025
K	3.256	±	0.025
S	0.479	±	0.021
Ba	< LOD	:	0.002
Cs	< LOD	:	0.001
Te	< LOD	:	0.002
Sb	< LOD	:	0.001
Sn	< LOD	:	0.001
Cd	< LOD	:	0.001
Ag	< LOD	:	0.001
Pd	< LOD	:	0.001

Supervised By: \_\_\_\_\_

XIII-1 – Exemplo de boletim analítico da composição química.

## Anexo XIV – RESULTADOS DAS ANÁLISES DE FITOTOXICIDADE

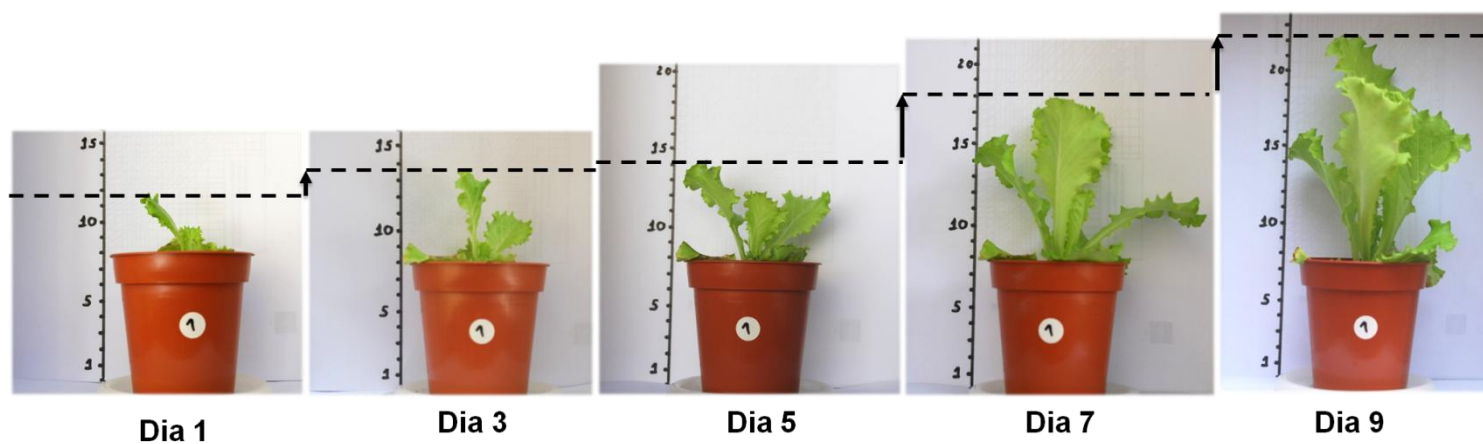


Figura XIV-1 – Reportagem fotográfica do vaso 1.

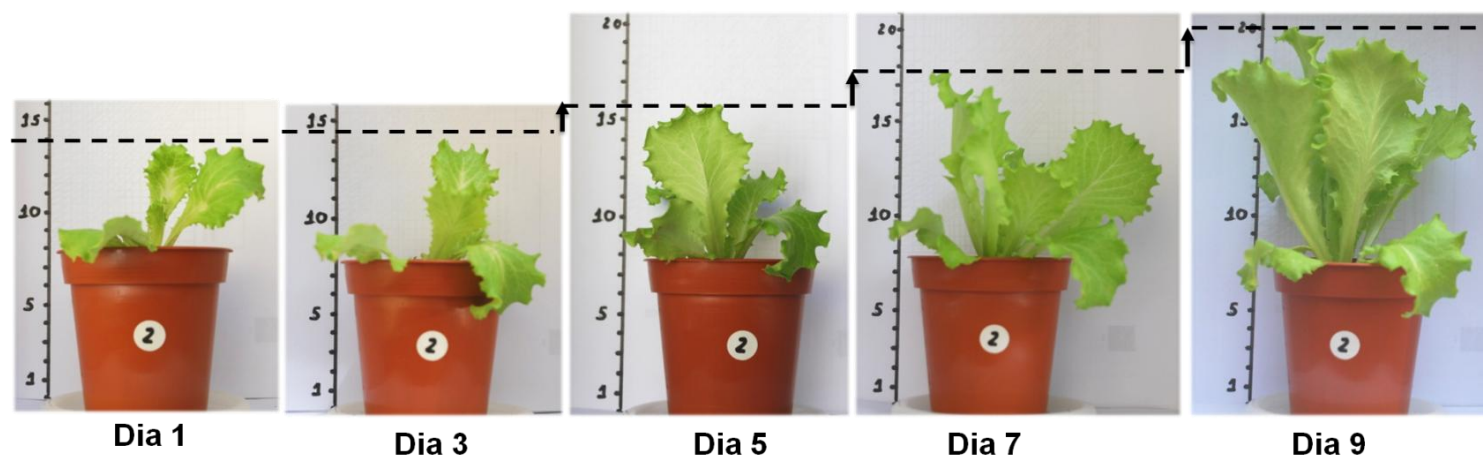


Figura XIV-2 - Reportagem fotográfica do vaso 2.

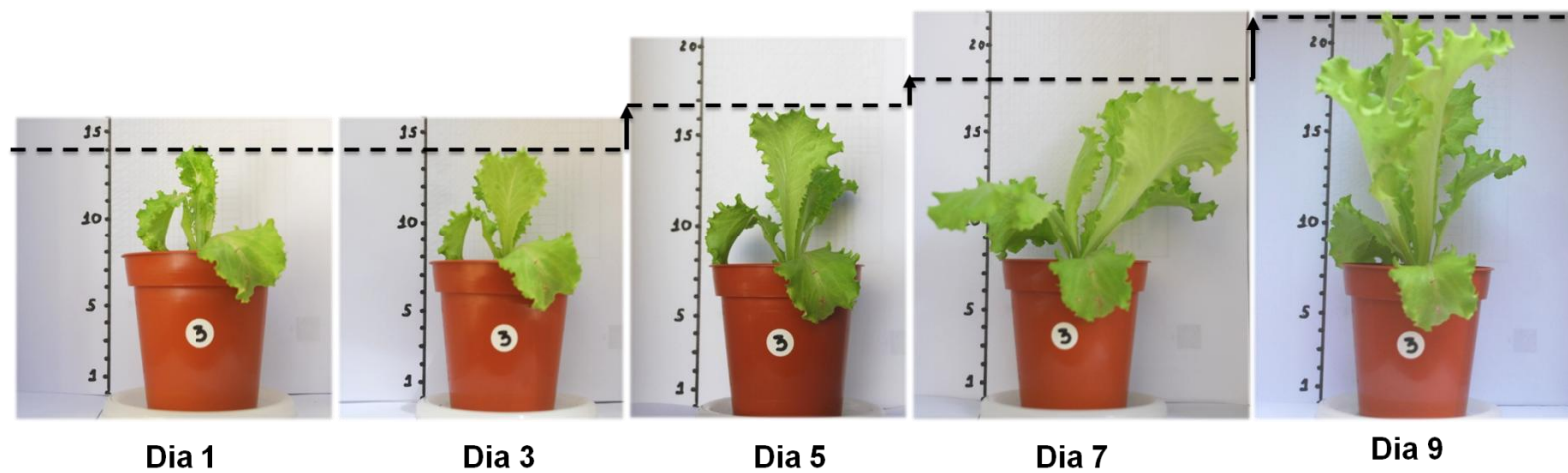


Figura XIV-3 - Reportagem fotográfica do vaso 3.

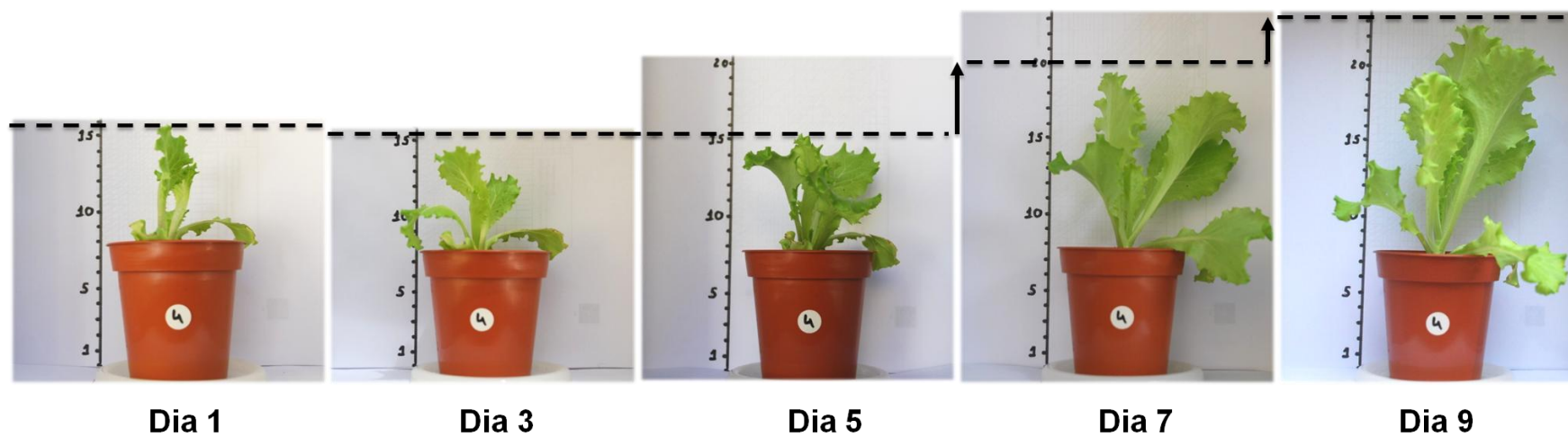


Figura XIV-4 - Reportagem fotográfica do vaso 4.



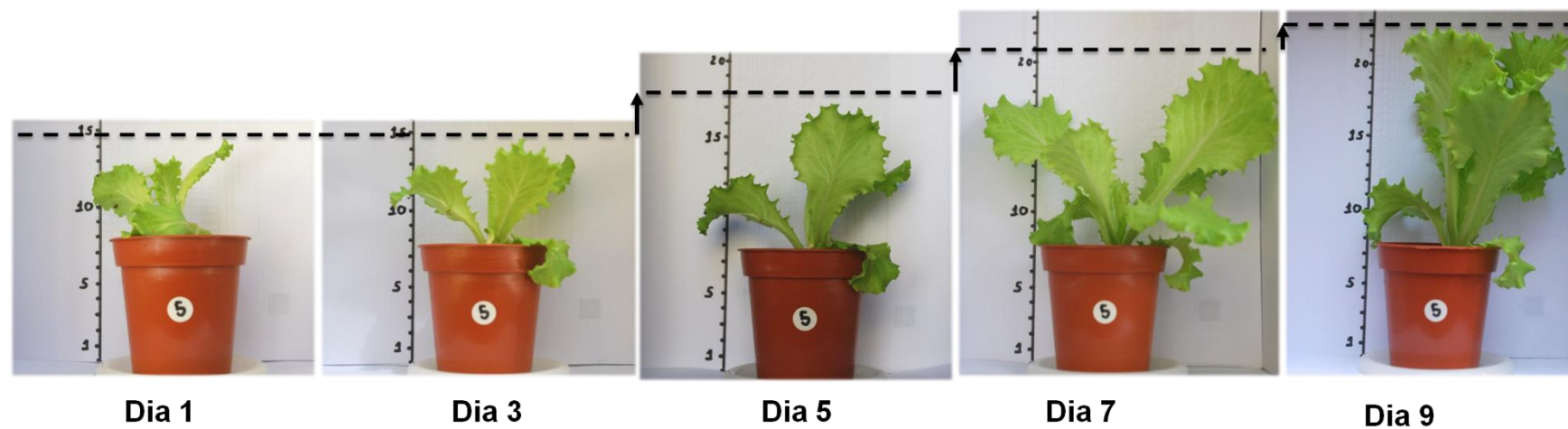


Figura XIV-5 – Reportagem fotográfica do vaso 5.

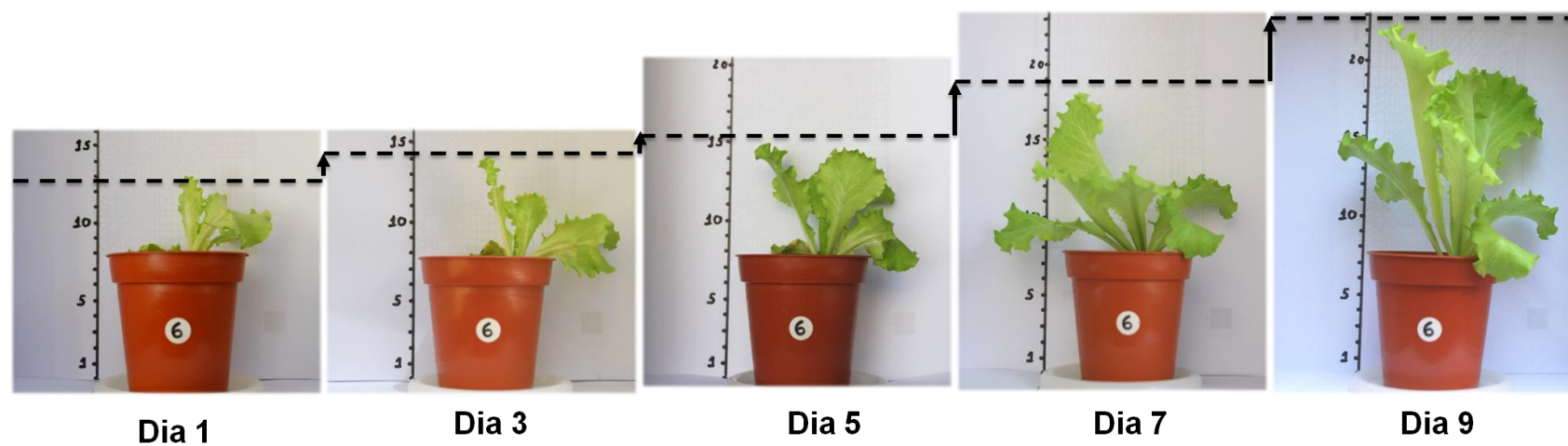


Figura XIV-6 - Reportagem fotográfica do vaso 6.

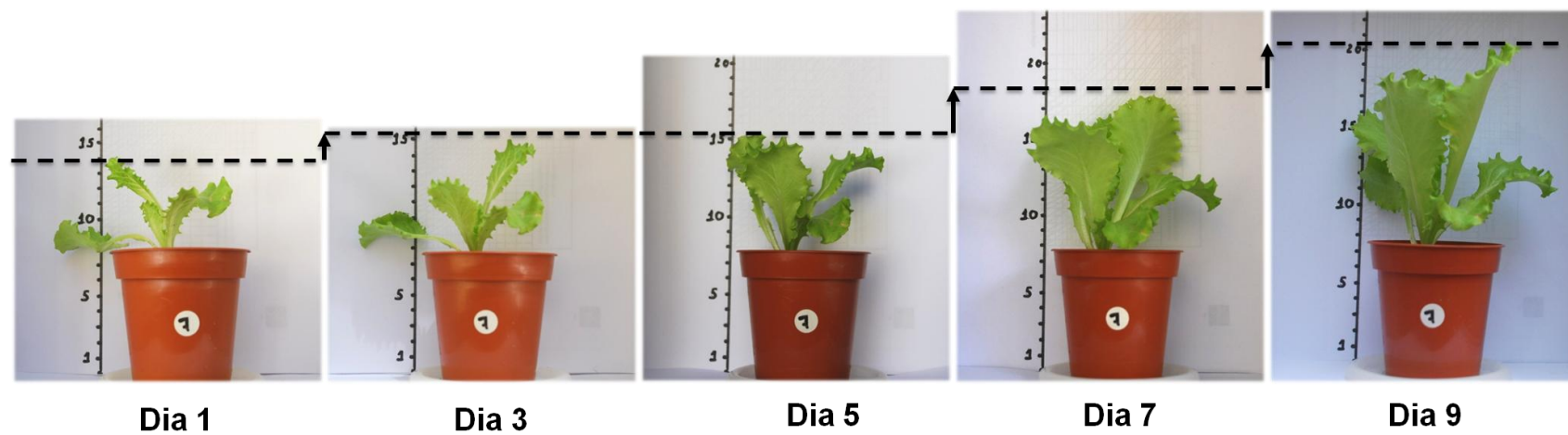


Figura XIV-7 - Reportagem fotográfica do vaso 7.



Figura XIV-8 - Reportagem fotográfica do vaso 8.

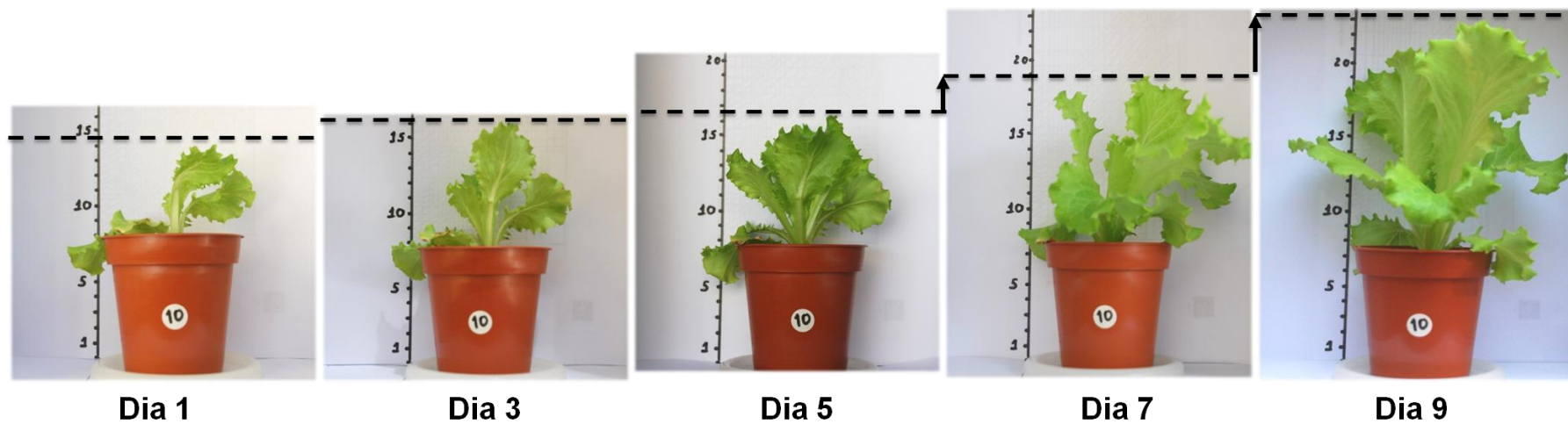


Figura XIV-9 – Reportagem fotográfica do vaso 10.

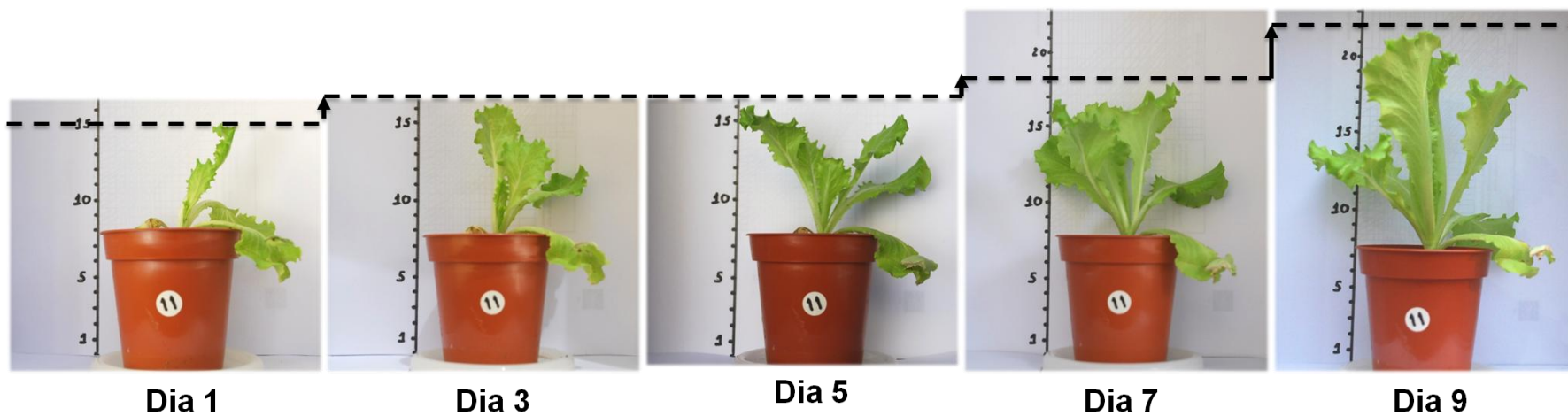


Figura XIV-10 - Reportagem fotográfica do vaso 11.



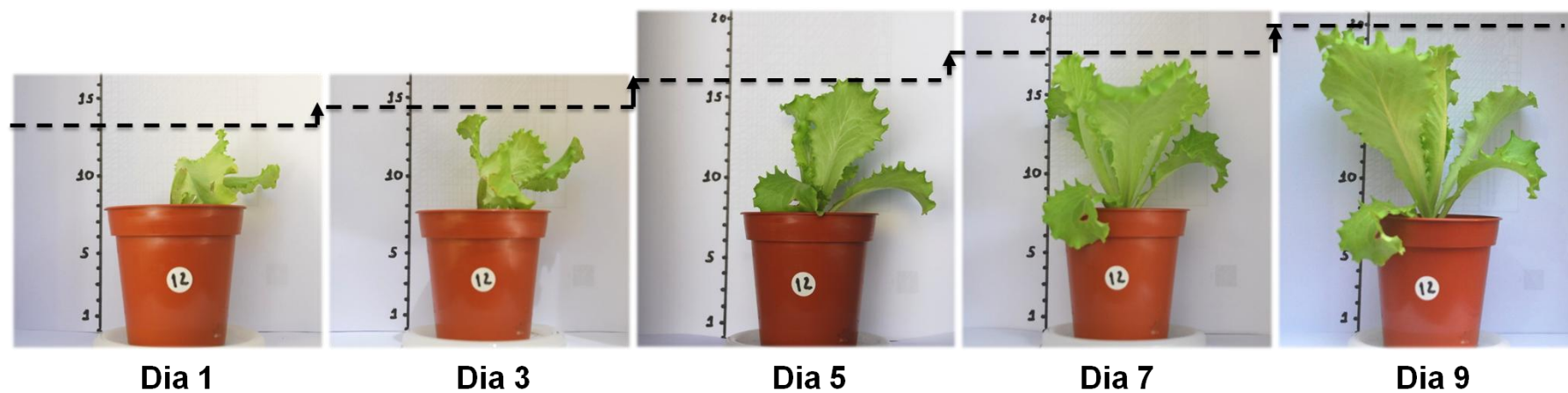


Figura XIV-11 – Reportagem fotográfica do vaso 12.

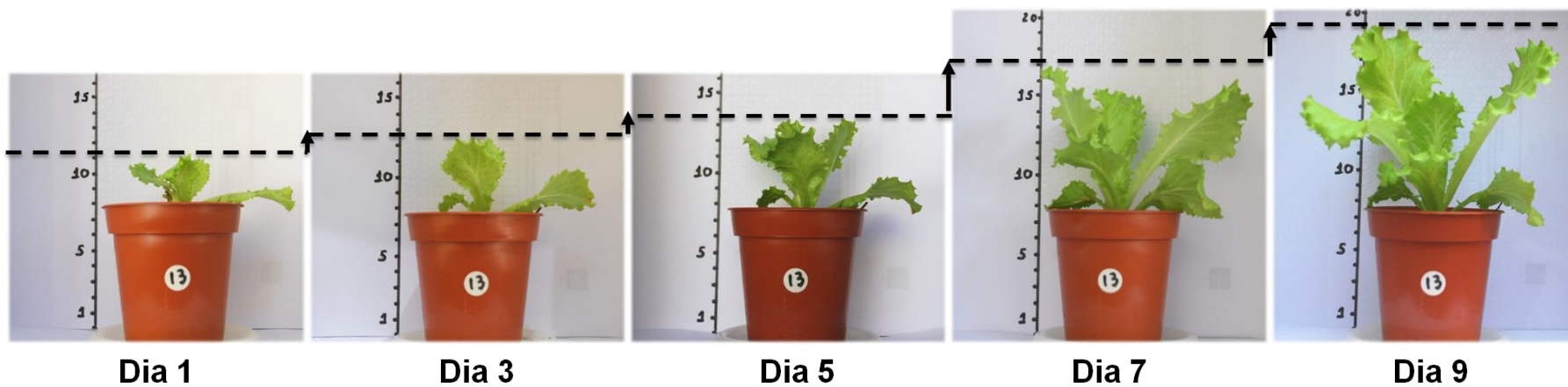


Figura XIV-12 – Reportagem fotográfica do vaso 13.





